

Estudi i disseny d'un sensor de pressió basat en IoT per a la monitorització intensiva de la xarxa d'aigua

Professor: Ramón Pérez Magrané

Alumne: Ricard Castell Creus



Índex

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 1.Introducció..... | 3 |
| 1.1.Motivació..... | 3 |
| 1.2.Objectius..... | 7 |
| 1.3.Abast..... | 8 |
| 2.Tria de hardware..... | 9 |
| 3.Software..... | 12 |
| 3.1.Epanet i R..... | 12 |
| 3.2.Ubidots..... | 14 |
| 3.3.IDE d'Arduino..... | 15 |
| 4.Muntatge experimental..... | 18 |
| 5.Simulació..... | 24 |
| 6.Experiments..... | 27 |
| 7.Pressupost..... | 35 |
| 8.Conclusions..... | 36 |
| 9.Annexos..... | 37 |
| 10.Referències..... | 40 |

1.Introducció

1.1.Motivació

Pel que fa a l'aigua, existeixen dos tipus de problemes principals:

- Problemes de subministrament:
 - Retirar aigua d'un punt d'aigua més ràpid que l'ompliment o recàrrega del mateix.
 - Qualitat de l'aigua baixa.
- Problemes de demanda:
 - Increment de la població mundial.
 - Tecnologies que consumeixen molta aigua.

Els problemes anteriors sumats a que només hi ha un 2,5% d'aigua dolça al planeta [1], obliga a que la gestió de l'aigua requereixi de sistemes avançats de monitorització i control en punts de subministrament, transport i xarxes de distribució.

En moltes ciutats, la xarxa d'aigua potable està gestionada mitjançant telemetria i sistemes de telecontrol. Aquesta tecnologia és capaç de proporcionar a temps real dades com la pressió, el cabal o la qualitat d'aigua en punts clau de la xarxa.

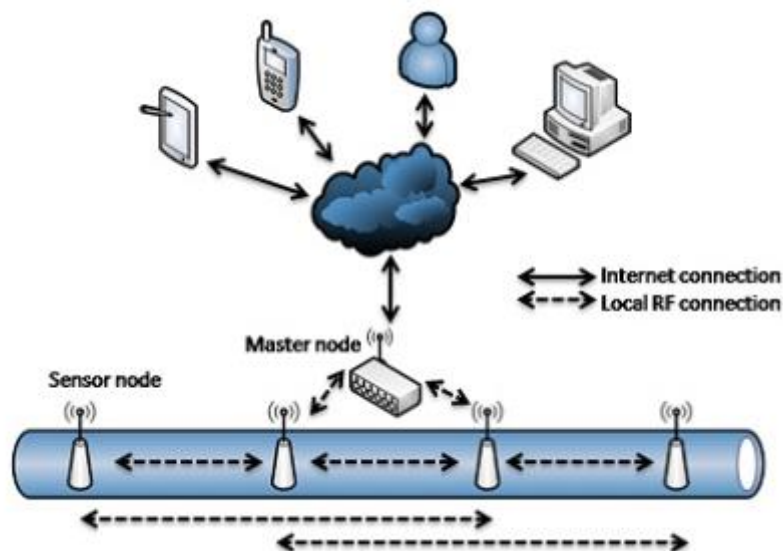


Figura 1. Esquema bàsic d'un sistema de telecontrol. Imatge extreta de l'article *Smart Pipes: Smart Wireless Sensor Networks for Leak Detection in Water Pipelines* (www.mdpi.com/2224-2708/3/1/64).

Controlar el cicle de l'aigua requereix el desenvolupament de models dinàmics adequats. La dinàmica de sistemes d'aigua també té components estocàstics com podrien ser la demanda de clients o la intensitat de la pluja, entre altres. Per aquesta raó, la gestió del sistema d'aigua s'ha de fer de manera predictiva.

La monitorització a temps real de xarxes d'aigua permet:

- L'anàlisi del balanç d'aigua a temps real.
- La reducció de la pèrdua d'aigua.
- La detecció i localització de fuites.
- La vigilància de la qualitat d'aigua.

En punts de consum també permet captar informació de la demanda dels consumidors. La monitorització requereix de tres elements: sensors, sistemes de comunicació i models matemàtics. La pressió acostuma a ser monitoritzada més fàcilment donat el baix cost dels sensors. D'aquesta manera, la detecció i localització de fuites basades en diferències entre pressions predites i mesurades està sent explorada [2].

Per tal de posar un exemple pràctic sobre com a partir de canvis de pressió es poden detectar fuites, s'ha utilitzat el software Epanet per simular una fuga [3]. La xarxa d'aigua que s'utilitzarà per a la simulació es mostra a la Figura 2.

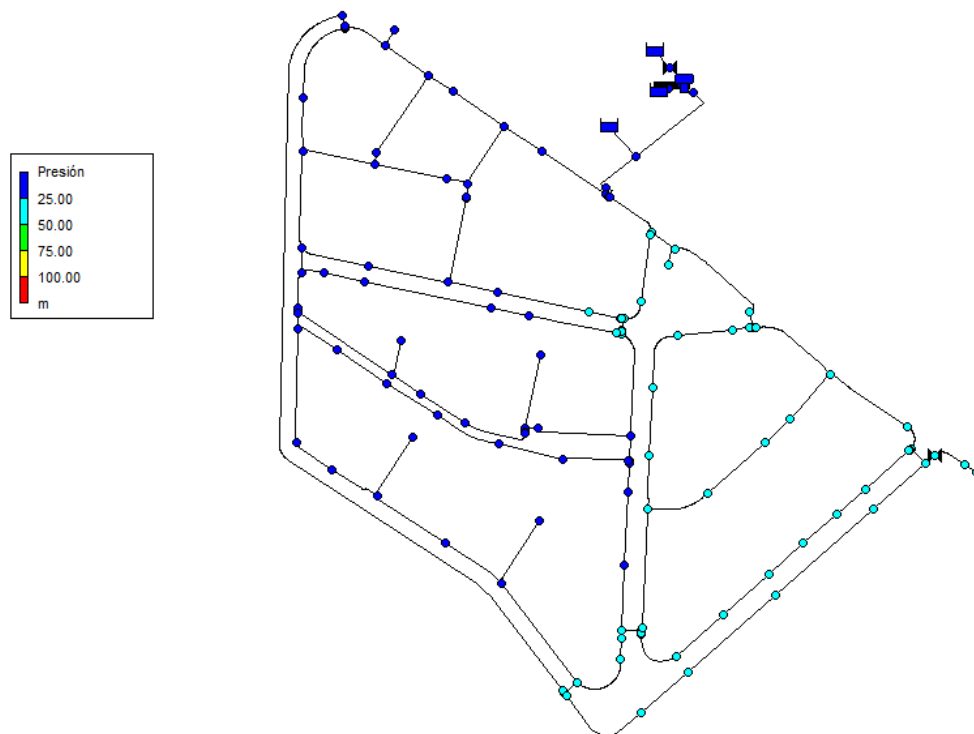


Figura 2. Xarxa de distribució d'aigua utilitzada per a la simulació mitjançant Epanet.

A la Figura 2 es pot veure una xarxa de distribució d'aigua sense fuites on cada node representa un punt de consum. Tota l'aigua de la xarxa és extreta de tres embassaments i un tanc. Tal i com indica la llegenda, els colors representen la pressió a cada node. Per tal de simular una fuga, s'escollirà un node a l'atzar (veure Fig.2) i es modificarà un paràmetre anomenat coeficient emissor (veure Fig.3).

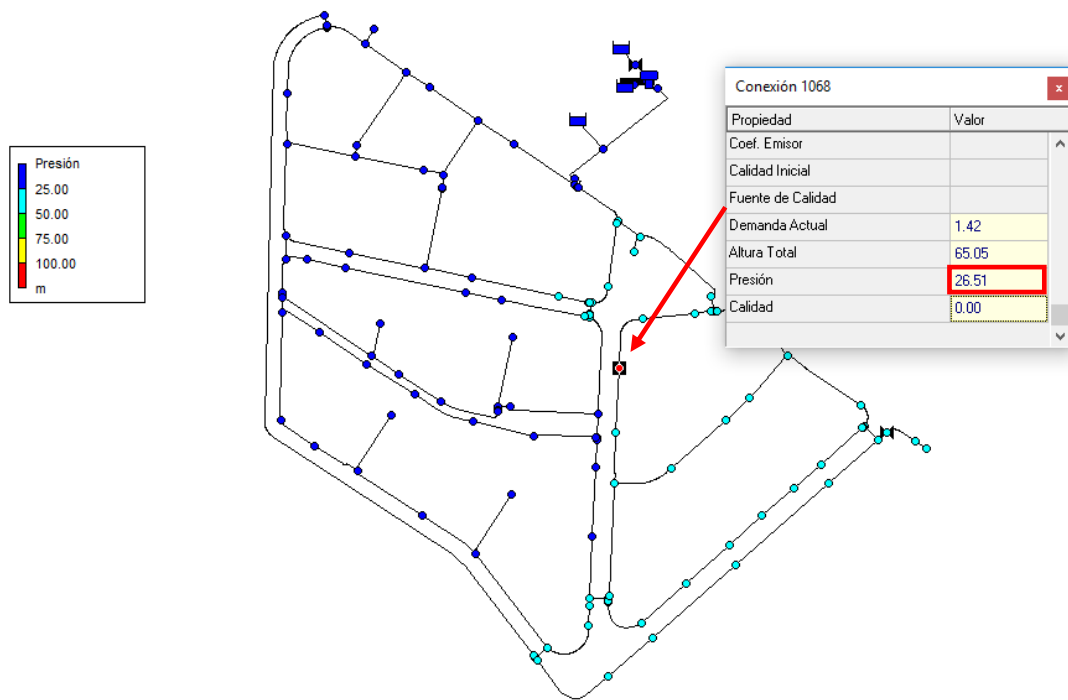


Figura 2. Node escollit per a la prova. Com es pot veure al quadre, la pressió actual del node té un valor de 26,51 mca.

| Conexión 1068 | |
|----------------------|------------|
| Propiedad | Valor |
| Patrón de Demanda | pattern_02 |
| Categoría de Demanda | 1 |
| Coef. Emissor | 3 |
| Calidad Inicial | |
| Fuente de Calidad | |
| Demanda Actual | 1.42 |
| Altura Total | 65.05 |
| Presión | 26.51 |

Figura 3. Modificació del valor del coeficient emissor. Abans de la modificació, el coeficient no tenia cap valor. Quan se li assigna un valor, s'està simulant una fuga.

Després d'haver simulat el model amb el nou valor del coeficient emissor, el resultat es pot veure a la Figura 4.

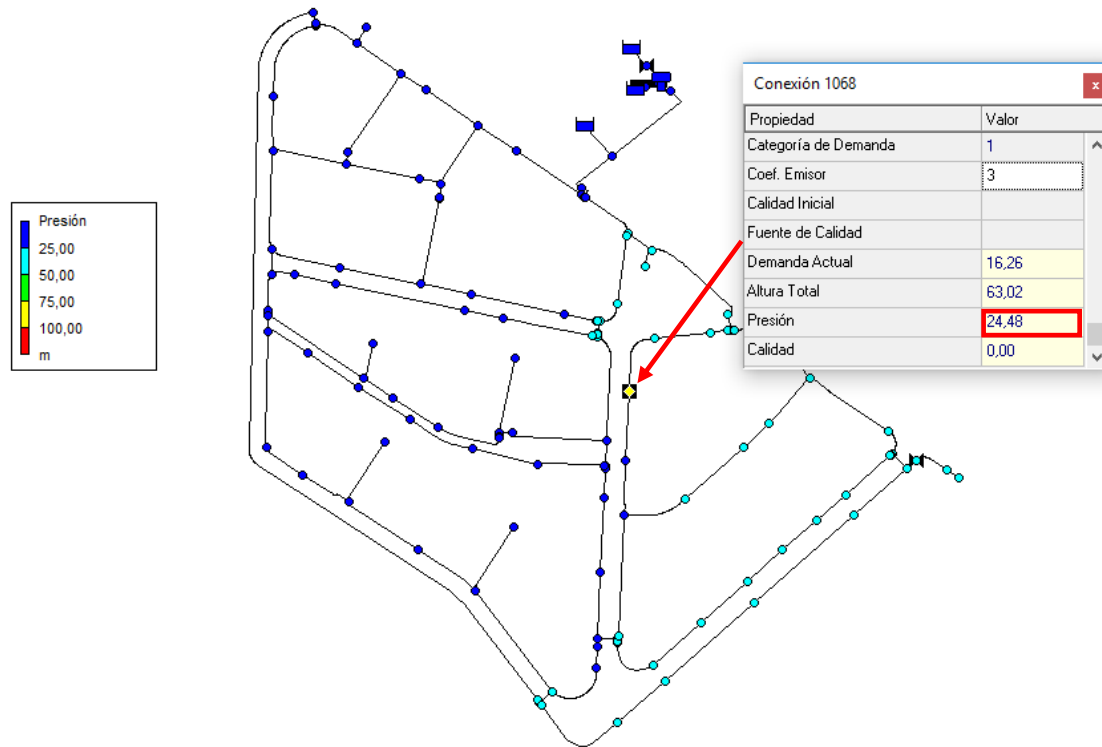


Figura 4. Després d'haver simulat la xarxa, la pressió del node té un valor de 24,48 mca.

Com es pot veure a la Figura 4, la pressió ha disminuït respecte a la pressió que tenia anteriorment. A més a més, la demanda actual del node ha augmentat respecte a la demanda que tenia anteriorment. Tot això és un indicador de que hi ha hagut una fuga.

De l'exemple anterior s'arriba a la conclusió de que si es mesura la pressió es podria arribar a detectar i localitzar la fuga. Per tal de fer efectiva la detecció i localització de fuites és necessària la incorporació d'una xarxa de sensors distribuïts per tota la xarxa d'aigua.

Aquest projecte té la motivació d'intentar promoure l'ús de xarxes de sensors en xarxes de distribució d'aigua per tal de convertir la xarxa d'aigua en una part de l'IoT i de les *Smart cities*. Tot això suposaria un empoderament per part dels consumidors i dels ens reguladors: l'ajuntament. Els primers perquè podrien saber en tot moment què està passant amb la seva pressió contractada i els segons perquè tindrien moltes més facilitats a l'hora de saber si el gestor dóna un bon servei als ciutadans. Cal afegir també, que aquesta iniciativa faria la ciutat més sostenible ja que la gestió i l'aprofitament de l'aigua seria molt més eficient.

1.2.Objectius

L'objectiu principal d'aquest projecte consisteix en dissenyar un prototipus que permeti la monitorització de la pressió en un punt de servei d'aigua. Aquest prototipus es col·locarà entre el punt de subministrament d'aigua de la xarxa domèstica i l'electrodomèstic.

Per tal de que la instal·lació del prototipus sigui viable, s'haurà de complir una sèrie d'objectius específics. Aquests objectius són els que es presenten a continuació:

- Tria de hardware: s'haurà d'escollir un hardware que sigui adient per a l'aplicació, e. g. un sensor de pressió que sigui capaç de llegir les pressions de treball d'una xarxa domèstica, un mòdul electrònic que pugui llegir la informació del sensor i enviar-la via WiFi a un ordinador, etc.
- Muntatge: caldrà un prototipus que es pugui instal·lar amb facilitat entre el punt de subministrament i l'electrodomèstic i que sigui útil a la pràctica.
- Programació: s'haurà de dissenyar un programa que faci possible la captació i l'enviament de les dades facilitades pel sensor. A més a més, s'haurà de fer ús d'alguna plataforma informàtica que permeti llegir les dades enviades des del mòdul electrònic.
- Proves de funcionament: les proves de funcionament permetran validar el correcte funcionament del prototipus.
- Simulació dels beneficis de tenir aquest sistema instal·lat: les simulacions s'utilitzaran per demostrar la necessitat d'instal·lar aquest prototipus.
- Redacció de la memòria: caldrà una memòria que expliqui detalladament el funcionament del prototipus i on s'exposin les simulacions i els resultats experimentals del mateix.

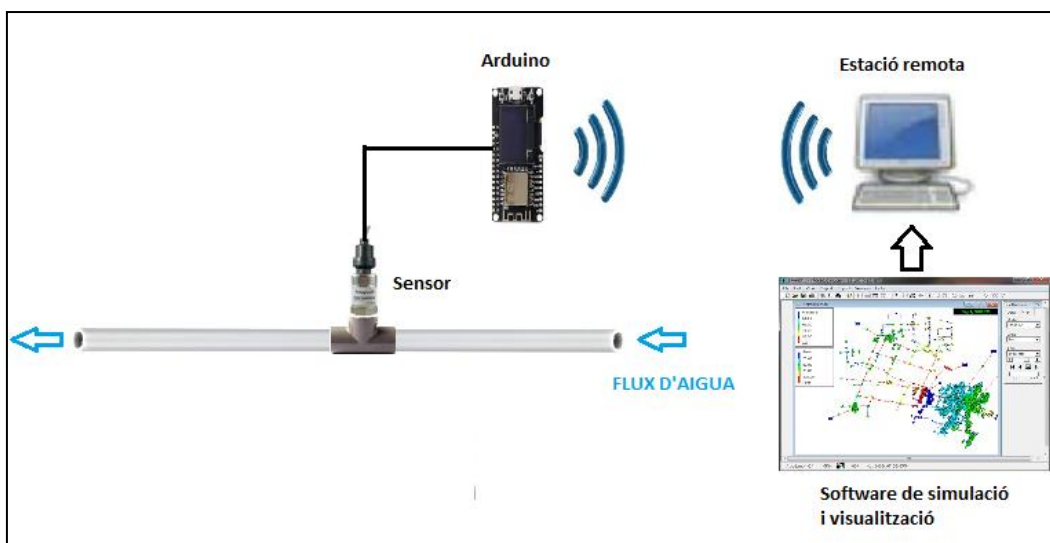


Figura 5. Il·lustració aproximada del prototip final de l'aplicació.

1.3.Abast

El muntatge del prototipus no anirà instal·lat dins de l'electrodomèstic, sino que es col·locarà entre el punt de subministrament d'aigua de la xarxa domèstica i la rentadora. Per tal de simplificar la instal·lació, s'ha decidit que en comptes de connectar-lo directament a la rentadora, es farà ús d'una vàlvula per simular la presència de la mateixa. D'aquesta manera, quan la vàlvula estigui tancada voldrà dir que no està entrant aigua a la rentadora i quan estigui oberta significarà que l'aigua està entrant a la rentadora.

Per captar les dades que proporcionarà el sensor, es farà ús d'un mòdul controlador (Arduino). La funció principal d'aquest controlador serà enviar les dades rebudes pel sensor a un ordinador a través de la xarxa WiFi domèstica. Per aconseguir això s'haurà d'escriure un programa amb l'ajuda de l'entorn de desenvolupament integrat d'Arduino (Arduino IDE) i posteriorment programar la placa. Aquest programa tindrà com a finalitat transformar la senyal de tensió analògica proporcionada pel sensor a una variable de pressió. Posteriorment, haurà d'enviar aquesta dada de pressió a l'ordinador.

La recol·lecció de les dades facilitades pel controlador es farà mitjançant una plataforma informàtica anomenada Ubidots. Aquesta eina informàtica permet llegir les dades d'un sensor i mostrar-les gràficament a temps real.

2. Tria de hardware

En aquesta secció s'analitzarà el per què dels elements de hardware que s'han escollit. Per a la realització de l'aplicació, s'han triat un total de quatre elements: un sensor de pressió, una placa controladora (Arduino o Raspberry Pi) i dos fonts d'alimentació.

Pel que fa a la tria del sensor, l'aplicació que es durà a terme requereix que aquest tingui les següents característiques:

- Rang de pressions de 0 – 70 mca.
- Precisió de 0,1 mca (s'accepten precisions de 0,2 i 0,3 mca com a màxim).
- Preu assequible.

Sumat a les especificacions anteriors, el sensor convé que tingui una estructura de diafragma intern (veure Fig. 6).

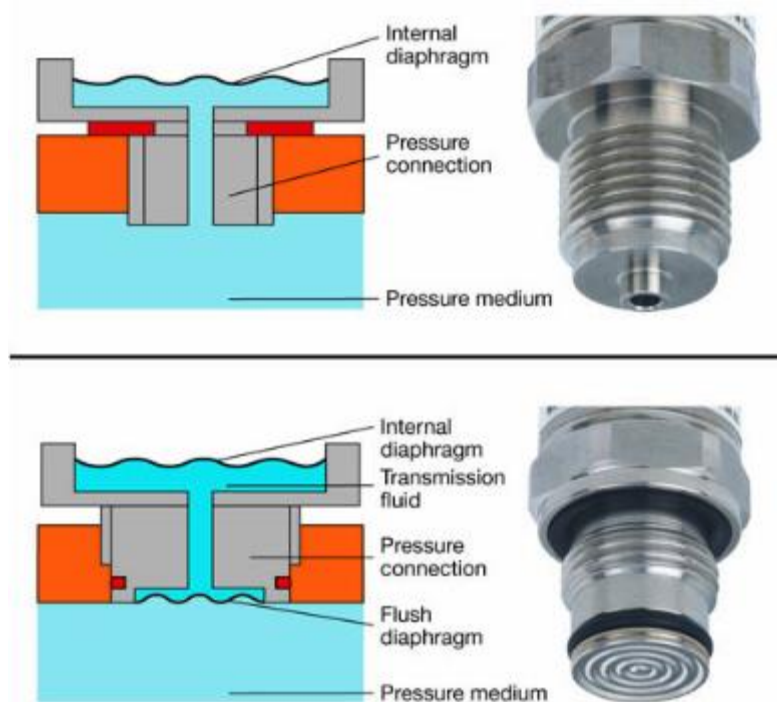


Figura 6. De dalt a baix, estructura de diafragma intern i estructura de diafragma extern. Cortesia de WIKA.

L'estructura de diafragma intern és ideal per treballar amb fluids poc viscosos i que no tinguin cristalls o partícules en suspensió com per exemple l'aigua. En aquest cas, el fluid pujaria pel conducte central i exerciria una pressió directament sobre el diafragma intern. Si aquest fluid fos viscos, hi hauria possibilitats que quan baixés el

nivell de fluid el conducte central es quedés impregnat de restes de fluid dificultant l'accés del mateix posteriorment. L'estructura de diafragma extern, en canvi, és ideal per treballar amb fluids viscosos o que tinguin partícules en suspensió. En aquest cas, el fluid exerceix una pressió sobre el diafragma extern (*Flush diaphragm*). Aquesta pressió es transmet fins al diafragma intern fent que el sensor pugui llegir la pressió exercida. Aquesta estructura evita el problema que té la de diafragma intern [4].

Després d'haver fet una cerca ràpida per Internet, el primer sensor que s'ha trobat ha estat el PX2EF1XX050PAAAX de Honeywell (veure Taula 1). Com es pot apreciar a la taula, la seva precisió entra dins del marge especificat. Malgrat això, el seu rang de pressions no compleix amb el rang desitjat i el seu preu és elevat. Es decideix continuar amb la cerca.

| Sensor | Fabricant | Preu (€) | Rang de pressions (mca) | Precisió (mca) | Sortida | Tensió d'entrada (V) |
|---------------------|-----------------|----------|-------------------------|----------------|--------------------------|----------------------|
| PX2EF1XX050PAAAX | Honeywell | 79,54 | 0 – 35,2 | 0,088 | Analògica 0 ~ 5 V | 5 |
| U5244-000002-014BA | TE Connectivity | 98,71 | 0 – 142,8 | 0,1428 | Analògica 1 ~ 5 V | 8 ~ 30 |
| SKU237545 | - | 8,78 | 0 – 122,37 | 1,8355 | Analògica 0,5 ~ 4,5 V | 5 |
| U5600-00000E-007BA | TE Connectivity | 192,19 | 0 – 71,38 | 0,0713 | BlueTooth | 3 |
| U7139-010BA-2-W0000 | TE Connectivity | 67,78 | 0 – 101,97 | 0,2549 | Analògica 0,5 ~ 4,5 V | 5 |
| PX2AN2XX150PAAAX | Honeywell | 68,85 | 0 – 105,53 | 0,1757 | Analògica 0,5 ~ 4,5 V | 5 |
| SKU REV-11-1107 | Rev Robotics | 26,4 | 0 – 140,62 | 2,1093 | Analògica 0,5 ~ 4,5 V | 5 |

Taula 1. Taula comparativa de diversos sensors de pressió industrials. Tots els sensors de la taula són de diafragma intern.

El següent sensor que s'ha trobat és el U5244-000002-014BA de TE Connectivity. Tant el seu rang de pressions com la seva precisió compleixen amb els requeriments. Cal mencionar també, que el rang de pressions no ha de ser molt elevat respecte al rang especificat ja que d'aquesta manera s'estaria desaprofitant la funcionalitat del sensor. Tot i això, el preu és superior respecte al del sensor anterior i es decideix seguir buscant.

Pel que fa al sensor SKU237545, es pot veure a la taula que és un sensor que té un preu molt assequible i, a més a més, el seu rang de pressions compleix amb els requeriments. L'inconvenient que té és la seva precisió ja que aquesta és de 1,8355

mca, quedant-se molt lluny de complir amb la precisió requerida. El sensor SKU REV-11-1107 de Rev Robotics també queda descartat per la mateixa raó.

El sensor U5600-00000E-007BA de TE Connectivity té un rang de pressions i una precisió excel·lents. El seu rang s'ajusta perfectament al rang especificat i és el sensor més precís dels que s'han trobat. Els seus inconvenients són el seu preu i el tipus de sortida, que és del tipus Bluetooth. Aquesta última convé que sigui analògica per a que es pugui connectar a la placa Arduino.

Finalment, es decideix escollir el sensor PX2AN2XX150PAAAX de Honeywell ja que comparat amb el sensor U7139-010BA-2-W0000 de TE Connectivity és més precís i el seu rang de pressions es considera raonable per a l'aplicació. Per a més informació sobre el sensor consulteu l'Annex 1.



Figura 7. Sensor de pressió PX2AN2XX150PAAAX de Honeywell escollit per a l'aplicació. Cortesia de Honeywell.

Pel que fa al mòdul controlador, el que es busca és una placa que sigui econòmica, que tingui Wi-Fi integrat i que tingui com a mínim una entrada analògica amb convertidor ADC integrat. Els mòduls que s'han comparat són els que es mostren a la Taula 2.

| Placa | Preu (€) |
|----------------------|----------|
| Arduino MKR1000 | 29,73 |
| Arduino NodeMCU V1.0 | 3,96 |
| Raspberry Pi 3 B+ | 36,40 |
| Raspberry Pi Zero W | 10,44 |

Taula 2. Taula comparativa de les diferents plaques que s'han escollit.

Tenint en compte que totes disposen de connectivitat Wi-Fi i tenen diverses entrades analògiques per col·locar-hi la sortida del sensor, es considera que la placa més adequada és la Arduino NodeMCU V1.0 ja que és la més barata i té totes les funcionalitats que el projecte necessita.

Pel que fa a la font d'alimentació, el que prima és trobar una font que sigui el més econòmica possible. L'Arduino va alimentat a 5V i s'ha trobat una font per 3,95 €. El sensor necessita una tensió d'alimentació entre 8 i 30V. En aquest últim cas, s'ha trobat una font d'alimentació regulable per 1,70 €. El pressupost final de l'aplicació el podeu trobar a la Taula 3 de l'apartat de Pressupost.

3. Software

El software utilitzat per al projecte ha permès fer les simulacions hidràuliques, programar la placa Arduino i enregistrar les dades experimentals del projecte. Per fer les simulacions s'ha utilitzat Epanet i R, per programar la placa s'ha fet ús de l'entorn de desenvolupament integrat d'Arduino (IDE d'Arduino) i, finalment, per enregistrar les dades enviades des de l'Arduino s'ha utilitzat la plataforma Ubidots.

3.1. Epanet i R

La raó per la qual s'ha escollit R per al projecte, és perquè es tracta d'un llenguatge i entorn de programació amb un enfocament a l'anàlisi estadístic. Això el fa molt atractiu per a la nostra aplicació atès que treballar amb xarxes d'aigua implica enfrontar-se amb grans quantitats de dades i haver de treballar en un entorn estadístic. A més a més, R també disposa d'una enorme capacitat gràfica que permet generar gràfics d'alta qualitat utilitzant funcions de graficació. Aquesta última característica ens permetrà treballar de manera més còmoda i tenir una visió més detallada sobre les nostres dades. Per últim, cal afegir que R compta amb un poderós entorn de desenvolupament anomenat Rstudio que es pot descarregar de forma gratuïta.

Per altra banda, Epanet és un programa que permet realitzar anàlisis hidràulics de xarxes de canonades a partir de les característiques físiques de les canonades i dinàmiques dels nodes (e.g. consums) per obtenir la pressió i els cabals en nodes i canonades respectivament. A més a més, també permet fer anàlisis sobre la qualitat de l'aigua.

A part de les característiques particulars de cada programa, Epanet i R poden treballar conjuntament per dur a terme tasques d'interès per al projecte com per exemple

simulacions hidràuliques, estudis energètics o estudis de detectabilitat, entre altres. Un exemple d'això es presenta a la Figura 8.

```

1 library(epanet2toolkit)
2 library(epanetReader)
3
4 ENopen("TestINP.inp", "TestINP.rpt")
5 ENSolveH()
6 p1<-ENgetnodevalue(2, "EN_PRESSURE")
7 ENsetnodevalue(2, "EN_EMITTER", 0.001)
8 ENSolveH()
9 p2<-ENgetnodevalue(2, "EN_PRESSURE")
10 ENCclose()
11
12 err<-(p1-p2)
  
```

Figura 8. Programa escrit amb R per a la seva utilització amb Epanet.

La Figura 8 mostra un *script* escrit en R utilitzant l'entorn de programació Rstudio. Aquest petit programa llegeix la pressió en un node d'una xarxa d'aigua i la compara amb la pressió del mateix node quan aquest pateix una fuga. A continuació, s'expliquen les instruccions pas a pas.

Abans d'executar el codi de la Figura 8, s'han d'haver instal·lat els paquets que permetran fer ús de les instruccions contingudes en l'*script*. Aquests dos paquets són *epanet2toolkit* i *epanetReader*. Per instal·lar-los, només cal introduir per la consola d'Rstudio les línies *install.packages(epanet2toolkit)* i *install.packages(epanetReader)* respectivament. Un cop instal·lats, el següent pas consisteix en carregar els paquets. Això s'aconsegueix amb les instruccions *library(epanet2toolkit)* i *library(epanetReader)*. Havent instal·lat i carregat els paquets, ja es poden utilitzar les funcions d'*epanet2toolkit* i *epanetReader* [5]. La instrucció *ENopen("TestINP.inp", "TestINP.rpt")* serveix per obrir l'*epanet2toolkit*. L'arxiu TestINP.inp és la xarxa d'aigua d'Epanet sobre la qual treballarem. *ENSolveH()* permet fer una simulació hidràulica completa de la xarxa. La línia 6 del codi llegeix la pressió del node 2 mitjançant la funció *ENgetnodevalue()* i la guarda a una variable que anomenarem p1. A la línia 7, a través de la funció *ENsetnodevalue()* modifiquem el valor del coeficient emissor del node 2 i el fixem a un valor de 0,001. Com ja s'ha vist a l'apartat d'Introducció, fixar un valor de coeficient emissor en un node és anàlog a simular una fuga. A la línia 8 tornem a fer una simulació hidràulica completa de la xarxa però aquest cop amb la fuga que hem creat. A continuació, guardem el valor de la pressió del mateix node a una variable que anomenarem p2. La funció *ENCclose()* serveix per tancar l'*epanet2toolkit*. Finalment, guardem la diferència de pressions en una variable que anomenarem err.

3.2.Ubidots

Ubidots és una plataforma informàtica basada en la tecnologia IoT i que està dissenyada per a que els usuaris o les empreses que la utilitzin puguin dur a terme els seus propis projectes relacionats amb l'IoT [6]. Per fer ús d'aquesta aplicació, és tan fàcil com crear-se un compte d'Ubidots. Un cop realitzat el pas anterior, a l'usuari se li entregarà una clau privada o *token* per a que pugui rebre i monitoritzar les dades dels seus projectes. Amb Ubidots l'usuari pot crear accions i events o generar alertes en funció de les dades que estigui rebent (e.g. rebre un correu electrònic quan la variable de temperatura d'un sensor superi un valor establert per l'usuari).

Ubidots també ofereix una manera eficaç de visualitzar les dades. Per visualitzar-les, es fan servir *dashboards* o panells de control on aquestes es poden veure a temps real de diverses maneres, ja sigui mitjançant gràfics, histogrames, taules, etc (veure Fig.9).

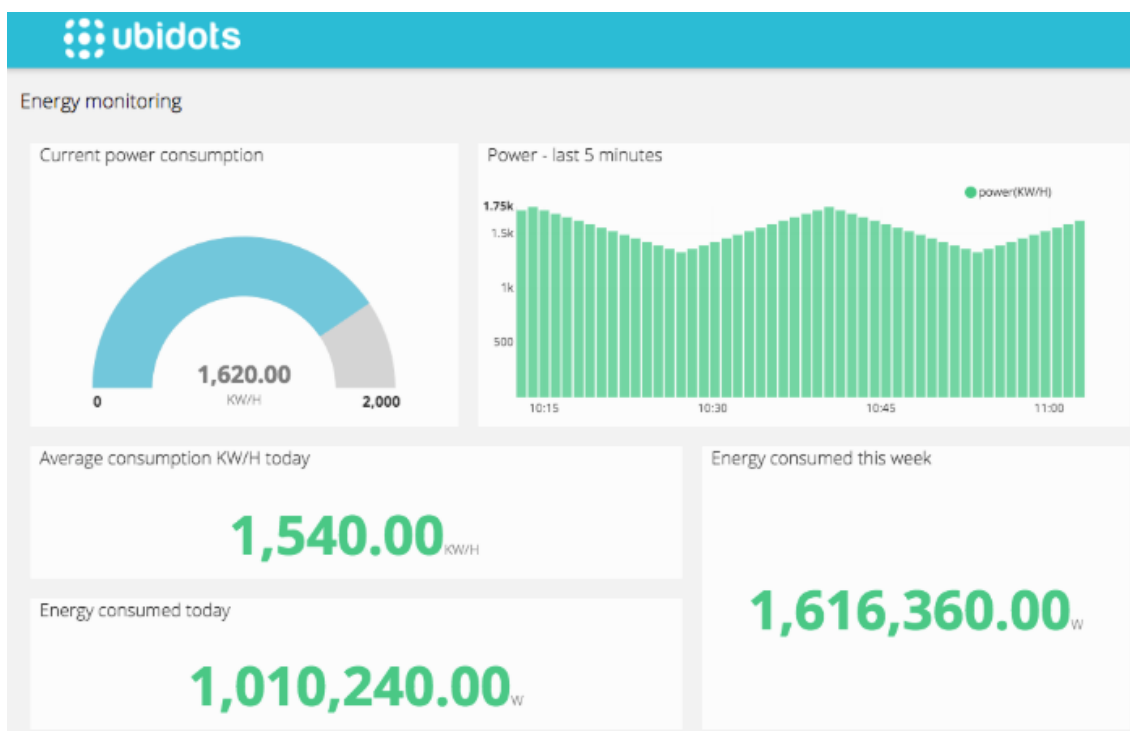


Figura 9. Exemple de *Dashboard* d'Ubidots. Imatge extreta de <https://ubidots.com/blog/iot-dashboards/>.

3.3.IDE d'Arduino

L'entorn de desenvolupament integrat d'Arduino és una aplicació multiplataforma, i.e. executable tant en Windows com en Linux i altres, que està escrita en el llenguatge de programació Java. Aquesta eina permet escriure programes amb C i C++ sota regles especials d'estructuració de codi per després ser carregats sobre qualsevol placa Arduino [7].

El codi que es programarà a l'Arduino es mostra a la Figura 10. Aquest programa té les següents funcions:

1. Llegir la magnitud de tensió enviada pel sensor a través del canal d'entrada analògica A0.
2. Convertir la variable de tensió en la seva respectiva variable de pressió.
3. Enviar la corresponent variable de pressió al compte d'Ubidots a través de la xarxa WiFi domèstica.

```
#include <UbidotsMicroESP8266.h>

#define TOKEN "....."
#define WIFISSID "....."
#define PASSWORD "....."

Ubidots client(TOKEN);
float adc_raw = 0;
float pressureValue_filt = 0;
float pressureValue;
#define alpha 0.05

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    client.wifiConnection(WIFISSID, PASSWORD);
}

void loop() {

    adc_raw = analogRead(A0);
    adc_raw = 0.001*(3.22*adc_raw);
    pressureValue = 2.380952*adc_raw-1.97619016;
    pressureValue = 10.2*pressureValue;
    pressureValue_filt = (alpha*pressureValue)+((1-alpha)*pressureValue_filt);
    client.add("pressure",pressureValue_filt);
    client.sendAll(true);
    delay(60000);
}
```

Figura 10. Codi que es programarà a la placa Arduino.

El codi anterior es compon de tres fases o blocs: el primer defineix les variables del programa, el segon té la funció d'inicialitzar el programa i el tercer és la part de codi que s'executarà indefinidament.

Dins del primer bloc es pot veure que s'inclou la llibreria `<UbidotsMicroESP8266.h>`. Aquesta llibreria inclou funcions que permetran a l'Arduino comunicar-se amb el compte d'Ubidots. Seguidament es defineixen tres variables anomenades TOKEN, WIFISSID i PASSWORD. Aquí l'usuari ha de posar la seva clau personal d'Ubidots, el nom de la seva xarxa WiFi personal i la contrasenya de la seva xarxa WiFi personal respectivament. Després d'això, es defineix el client d'Ubidots al qual se li enviarà la informació i quatre variables que s'utilitzaran durant l'execució del programa.

El segon bloc està format pel codi que està contingut dins de la funció `void setup()`. Aquesta funció només s'executarà una única vegada un cop es programi la placa Arduino. La funció `Serial.begin(115200)` defineix la velocitat de transmissió sèrie en bits/s. La funció `client.wifiConnection(WIFISSID,PASSWORD)` serveix per a que l'Arduino es connecti a una xarxa WiFi amb un SSID i una contrasenya donades.

Finalment, el tercer bloc pertany al codi que està confinat dins de la funció `void loop()`. El contingut d'aquesta funció s'executarà de manera indefinida. La funció `analogRead(A0)` s'encarrega de llegir la informació que li arriba a l'Arduino a través del canal A0. Aquesta dada es guarda a la variable `adc_raw`. Posteriorment, aquesta mateixa variable es multiplica per 3,22 i per 0,001. Això és degut a que quan l'Arduino llegeix a través del canal analògic, el valor que llegeix no és un valor de tensió sinó un valor enter comprès entre 0 i 1023 (un total de 1024 valors). El canal analògic de l'Arduino NodeMCU té un rang de tensió comprès entre 0 i 3,3 V. Amb aquesta informació es pot deduir el valor en V/unitat del canal analògic dividint 3,3 entre 1024. Aquesta divisió dóna la xifra de 3,22 mV/unitat. Si es vol expressar aquest valor en V/unitat només cal multiplicar-lo per 0,001. Aquesta és la raó per la qual es multiplica la variable `adc_raw` per 3,22 i per 0,001 i es torna a guardar a la mateixa variable. A continuació, s'utilitza la variable `adc_raw` per obtenir la variable de pressió `pressureValue`. Aquesta línia de codi representa la funció característica del sensor i s'ha obtingut a partir de les lectures d'un baròmetre que s'ha col·locat juntament amb el sensor. S'han fet un total de dues lectures, una sense aigua i l'altra amb la canonada plena. Per a cada lectura, s'ha utilitzat un multímetre per llegir el valor de tensió que proporcionava el sensor. Durant la primera lectura, el baròmetre marcava un valor de 0 bar i el multímetre marcava un valor de 0,785V. Durant la segona lectura, el baròmetre marcava 2,5 bar i el multímetre 1,835V. L'equació de la recta que s'obté a partir d'aquests 2 punts i que definirà el comportament del sensor és $pressureValue = 2,380952 * adc_raw - 1,97619016$. Seguidament, es realitza una conversió d'unitats (bar a mca) multiplicant el valor de pressió obtingut per 10,2.

Un cop obtingut el valor de pressió, abans que aquest s'envii a través de la xarxa mitjançant la funció *client.sendAll(true)*, aquest es filtra mitjançant un filtre passa baixos digital i es guarda a la variable *pressureValue_filt*. Un filtre passa baixos digital, també anomenat filtre exponencial EMA (Exponential Moving Average), té la funció d'eliminar el soroll d'alta freqüència que es superposa a la senyal d'interès i respon a l'equació que es mostra a continuació:

$$S(t) = \begin{cases} Y(0) & t = 0 \\ \alpha Y(t) + (1 - \alpha)S(t - 1) & t > 0 \end{cases}$$

On el coeficient α representa un factor de suavitat comprès entre 0 i 1, $Y(t)$ és el valor de la senyal a filtrar en un període de temps t , $S(t)$ és el valor de la EMA en qualsevol període de temps t i $S(t-1)$ és el valor de la EMA en el període de temps $t-1$ (passat).

El resultat d'aquest filtre passa baixos és un senyal suavitzat on la qualitat de suavitzat depèn del factor α :

- Si $\alpha=1$, la sortida del filtre queda sense filtrar ja que $S(t) = Y(t)$.
- Si $\alpha=0$, el valor filtrat de la sortida serà sempre 0 ja que $Y(t)$ no tindria efecte sobre la sortida del filtre.

Disminuir el factor α augmenta el suavitzat de la senyal però també incorpora certs inconvenients. Per una banda, s'eliminen components freqüencials que realment ens podrien ser d'interès, classificant com soroll una cosa que realment fos una variació real de la senyal. En el cas de la pressió, aquesta conseqüència negativa del filtre no té massa efecte ja que la pressió en un edifici és una variable que té variacions lentes.

Per altra banda, disminuir el factor α augmenta el temps de resposta del sistema, és a dir, el temps que triga el sistema en establitzar-se davant d'una entrada constant. Com es veurà més endavant a l'apartat d'Experiments, els experiments fets amb el filtre tindran una fase transitòria d'estabilització.

En principi, s'haurà d'ajustar el valor del coeficient α per a que resulti adequat per a la nostra aplicació, essent valors habituals 0,2 – 0,6 [8].

4. Muntatge experimental

La idea del muntatge experimental consisteix en simular l'entrada d'un electrodomèstic i llegir la pressió que hi ha mitjançant el sensor. L'esquema de la instal·lació es mostra a la Figura 11.

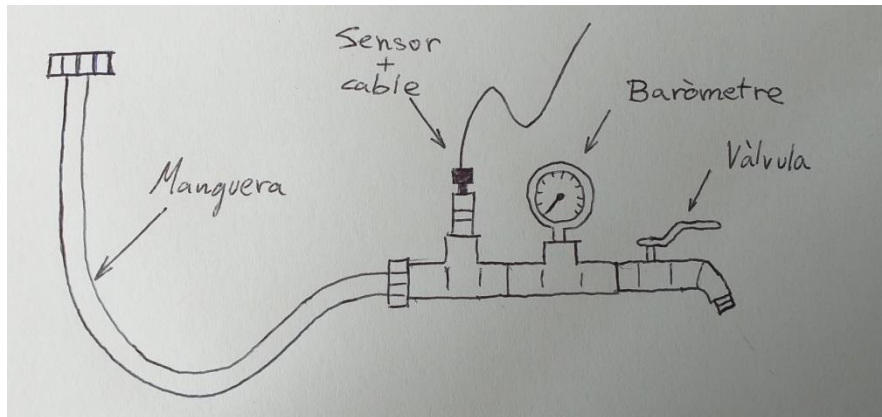


Figura 11. Esquema bàsic de la instal·lació

La vàlvula de la instal·lació substituirà la vàlvula d'entrada d'aigua d'una rentadora i el baròmetre servirà per calibrar el sensor. A la pràctica seria més convenient col·locar entre la peça de la vàlvula i la del baròmetre una altra manguera ja que aquesta seria la part on estaria el xassís de la rentadora i, d'aquesta manera, es podria connectar la manguera a la rentadora. Tot i això, per a la realització d'aquest prototipus no s'ha considerat aquest aspecte per qüestions de simplicitat i comoditat.

Els materials que s'han utilitzat per a la realització del prototipus són els següents:

- 1 manguera de rentadora de Nylon de 1,5 m.
- 1 tub de 50 ml de tefló líquid PTFE.
- 1 baròmetre analògic de glicerina de 4 bar.
- 2 connexions de tipus T de llautó roscades de 3/4".
- 2 mascles de llautó de 3/4".
- 2 reduccions de llautó mascle-femella de 3/4" x 1/2".
- 1 reducció cilíndrica de metall cromat mascle-femella de 1/2" x 1/4".
- 1 reducció cilíndrica de metall cromat mascle-femella de 1/2" x 1/8".
- 1 aixeta Racor de 3/4 – 1".
- 1 sensor de pressió PX2AN2XX150PAAAX de Honeywell.
- 1 cable amb connector de 3 pins de Honeywell.
- 1 placa CT-2 estàndard de fibra de vidre de 77x90 mm.
- 1 rotllo de cable flexible vermell de coure Ø0,50 mm + PVC.
- 1 Arduino NodeMCU V1.0.

Per a les connexions de la canonada s'ha optat pel llautó ja que és un material àmpliament utilitzat en lampisteria i, a més a més, és bastant més barat que el coure. Les peces de llautó de la canonada s'han unit mitjançant tefló líquid PTFE. Aquest és un tipus de tefló que, a diferència del tefló de cinta tradicional, permet acoblar i desacoblar les peces molt fàcilment garantint una bona resistència a vibracions i un segellat instantani. El mètode d'ús consisteix en aplicar-lo al voltant de la rosca mascle (veure Fig. 12). Un cop aplicat, es procedeix a enroscar el mascle amb la femella lentament per a que es vagi repartint el tefló per tota la rosca.



Figura 12. A l'esquerra, aplicació del tefló líquid sobre rosca mascle. A la dreta, tub de tefló líquid PTFE.

El procediment d'aplicació de tefló líquid sobre mascle i posterior enroscat amb femella s'ha realitzat sobre totes les rosques del prototipus excepte per una. La instal·lació disposa d'un total de 10 rosques sobre les quals s'hi aplica el tefló. L'única rosca que es deixa és la part del mascle de llautó de 3/4" que va unida a la manguera. A la Figura 13 es mostra un esquema de la instal·lació peça per peça i a la Figura 14 es mostra el resultat final de la instal·lació.

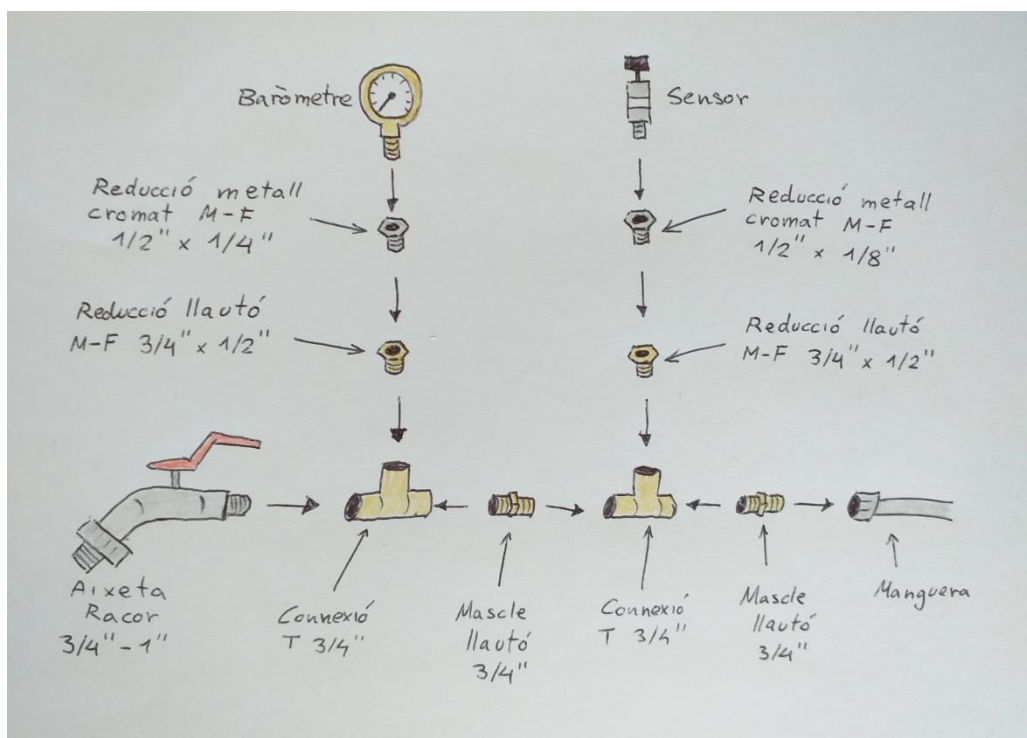


Figura 13. Esquema peça per peça de la instal·lació.



Figura 14. Resultat final de la instal·lació.

Per culminar amb la part de lampisteria, finalment es procedeix a realitzar un orifici entre l'exterior i l'interior del baròmetre tallant el sortint de cautxú que hi ha la part superior del baròmetre (veure Fig.15). Això permetrà que l'agulla del baròmetre oscil·li menys i tingui una lectura més precisa. És important que a l'hora de fer lectures amb el baròmetre, aquest es trobi en posició vertical per a que pugui donar una lectura adequada i per a que la glicerina no surti per l'orifici superior.



Figura 15. Orifici superior del baròmetre.

Un cop acabada la canonada amb tots els seus components, es procedeix amb el muntatge de la part electrònica. Primer es connecta el cable del sensor de Honeywell al sensor. Aquest cable disposa d'un connector especial de 3 pins i de tres cables: un cable vermell, un negre i un de blanc (veure Fig. 16). El cable vermell i el negre són l'alimentació del sensor i representen el positiu i el negatiu respectivament. El cable blanc és el cable de sortida analògica del sensor. Aquest cable proporcionarà la senyal de tensió que haurà de llegir la placa Arduino per determinar la pressió actual de la canonada.

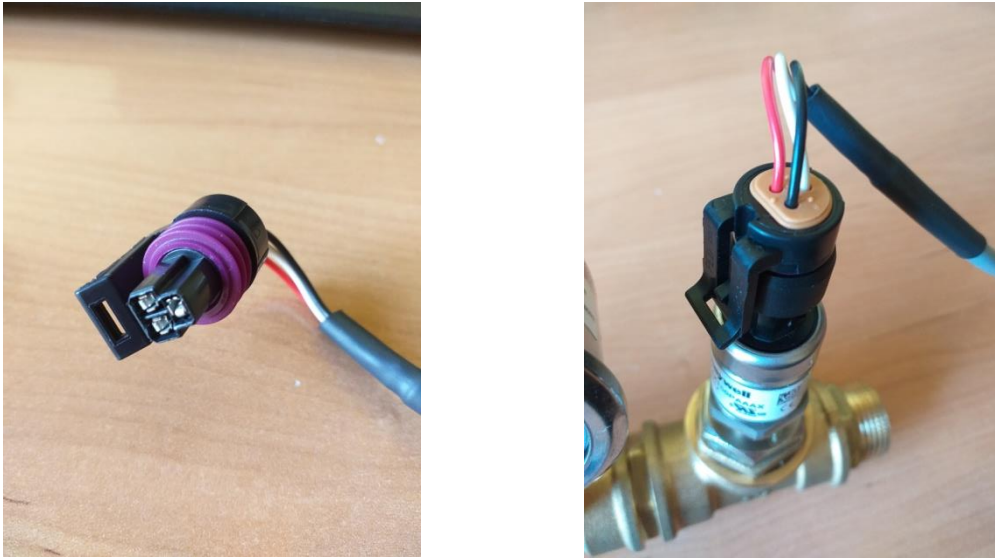


Figura 16. Cable del sensor de Honeywell de 3 pins.

Cada cable del sensor anirà connectat a un pin específic de la placa Arduino. El cable vermell anirà al pin Vin, el cable negre anirà al pin GND i el cable blanc anirà al pin A0 (veure Fig. 17). Els pins Vin i GND representen l'alimentació de la placa. Com que l'Arduino i el sensor van alimentats a 5V, els seus respectius cables d'alimentació s'uneixen per després anar connectats a una única font externa de 5V i alimentar els dos dispositius a la vegada. El pin A0 és el pin d'entrada analògica de la placa.

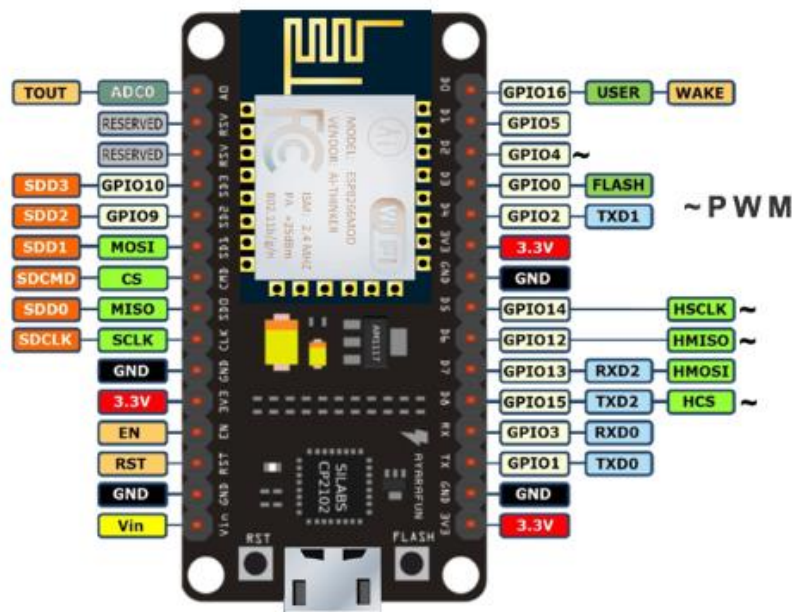


Figura 17. Pins de l'Arduino NodeMCU V1.0. Imatge extreta de www.teachmemicro.com/nodemcupinout/

Per connectar el cable del sensor amb l'Arduino i la font externa s'ha utilitzat una placa de fibra de vidre sobre la qual s'hi han soldat mitjançant un soldador d'estany els diversos elements. Les soldadures han servit per fer les connexions i per subjectar les patilles de la base de l'Arduino (veure Fig. 18).

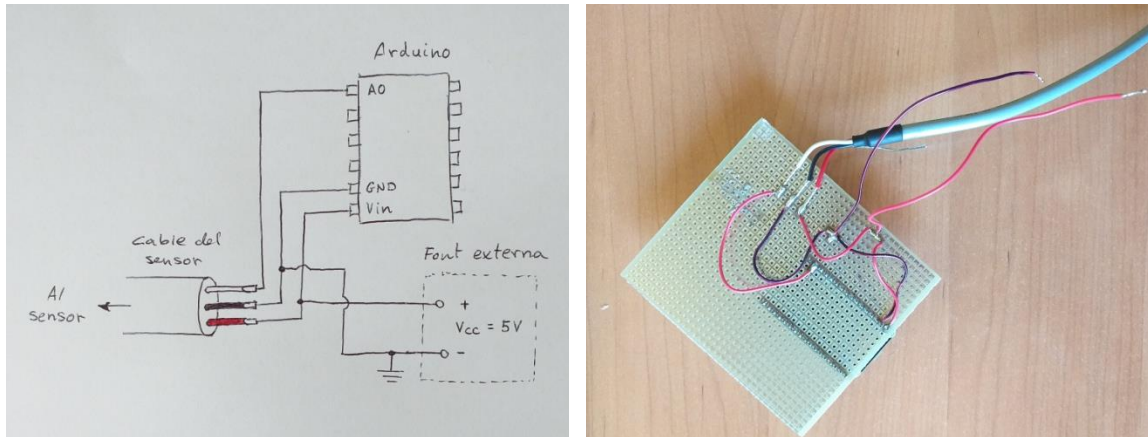


Figura 18. A la dreta, esquema de la connexió. A l'esquerra, muntatge final de la connexió.

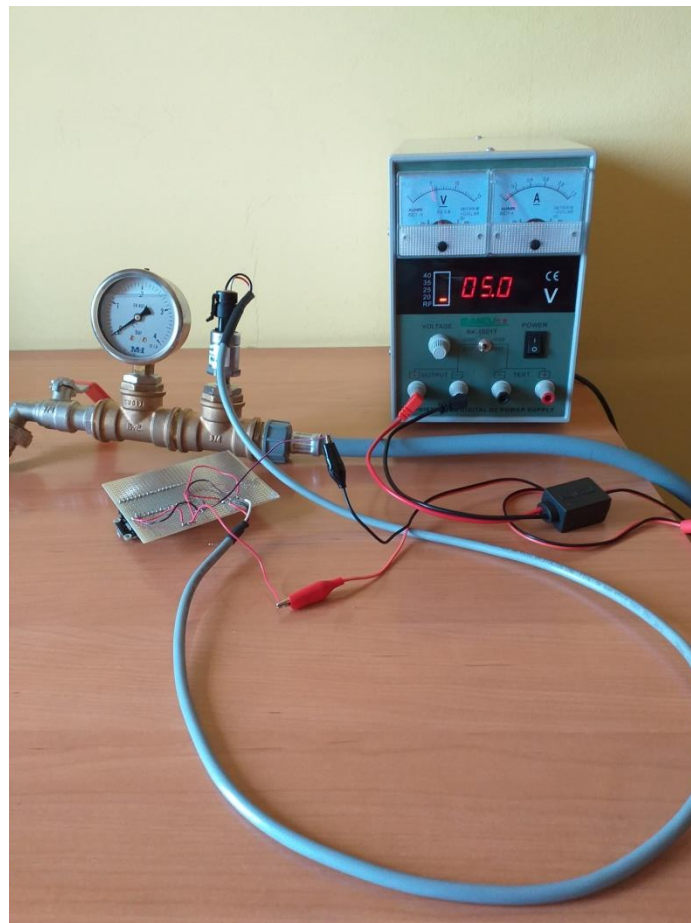


Figura 19. Instal·lació completa amb font d'alimentació externa de 5V.

5.Simulació

Les simulacions que s'han dut a terme han estat mitjançant Epanet i R. Aquestes han servit per fer estudis de detectabilitat de fuites sobre una xarxa d'aigua determinada. La xarxa sobre la qual s'han fet les simulacions es mostra a la Figura 20. La primera simulació que s'ha realitzat ha estat la que es mostra a l'Annex 2. Aquesta s'ha fet estudiant la demanda de cada punt de consum per després representar la mitjana estadística de la quantitat d'aigua en L/s que es perdria en funció del coeficient emissor aplicat.

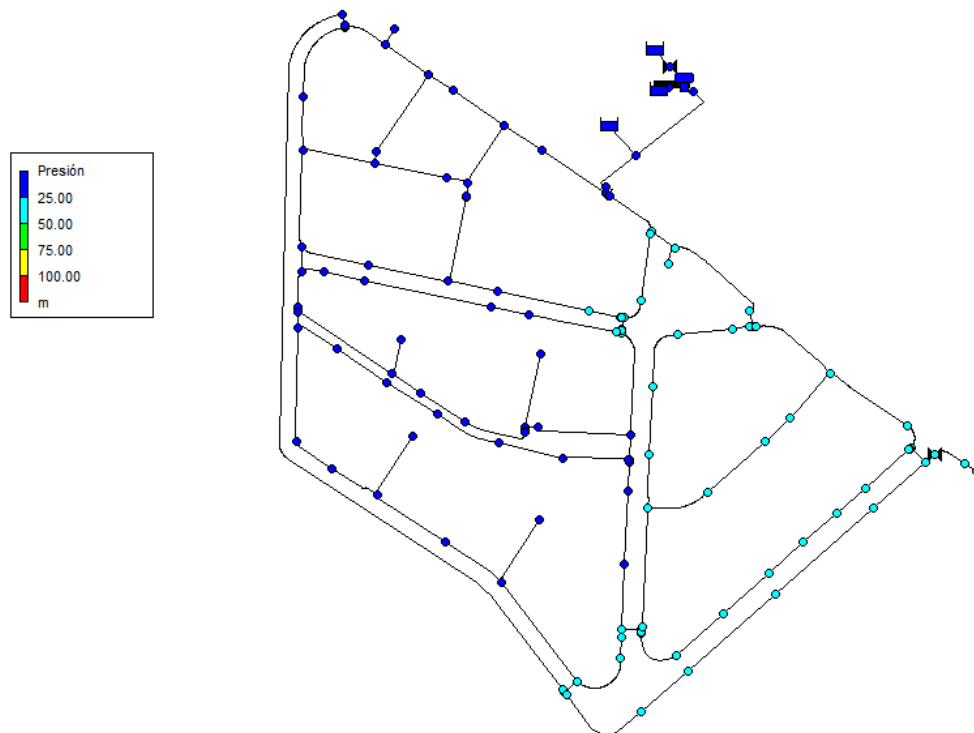


Figura 20. Xarxa d'Epanet sobre la que s'han fet les simulacions.

El diagrama de flux del programa utilitzat per a la simulació de la demanda d'aigua es troba representat a la Figura 21. A la Figura 22 es troba representat el gràfic resultant de la simulació.

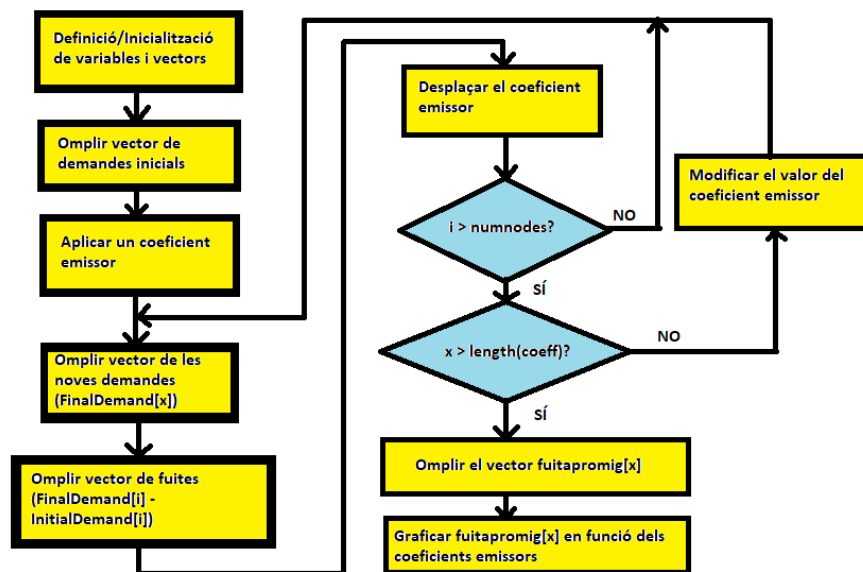


Figura 21. Diagrama de flux del programa utilitzat a la simulació de les demandes.

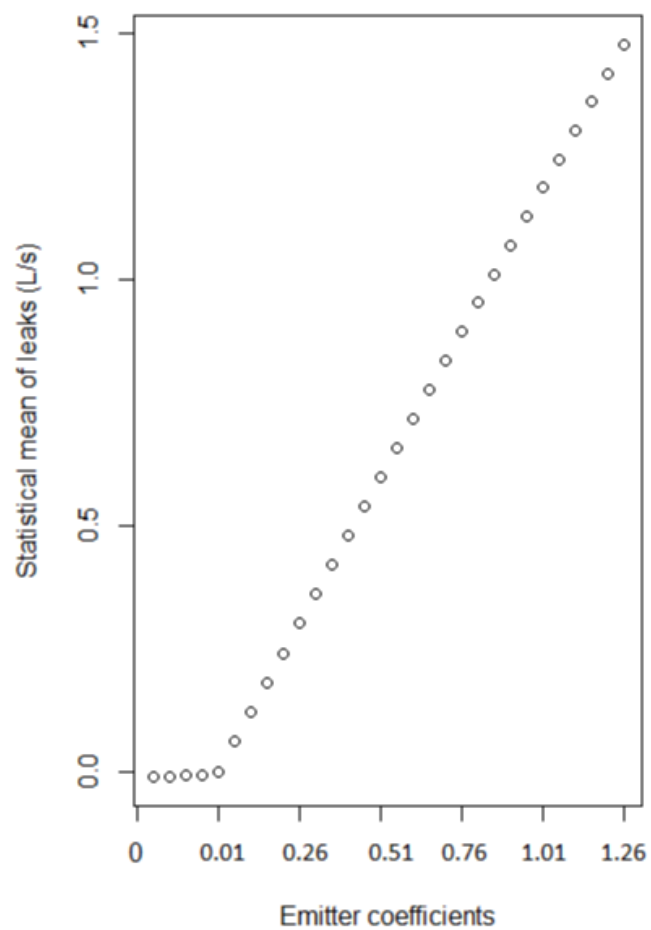


Figura 22. Gràfic de la mitjana estadística de les fuites expressada en L/s.

La segona simulació té la mateixa estructura de codi que la primera però analitza la diferència de pressions dels nodes en comptes de la demanda dels mateixos. El codi d'aquesta simulació es pot trobar a l'Annex 3. Un cop executat el codi, el gràfic que surt per pantalla és el que es mostra a la Figura 23.

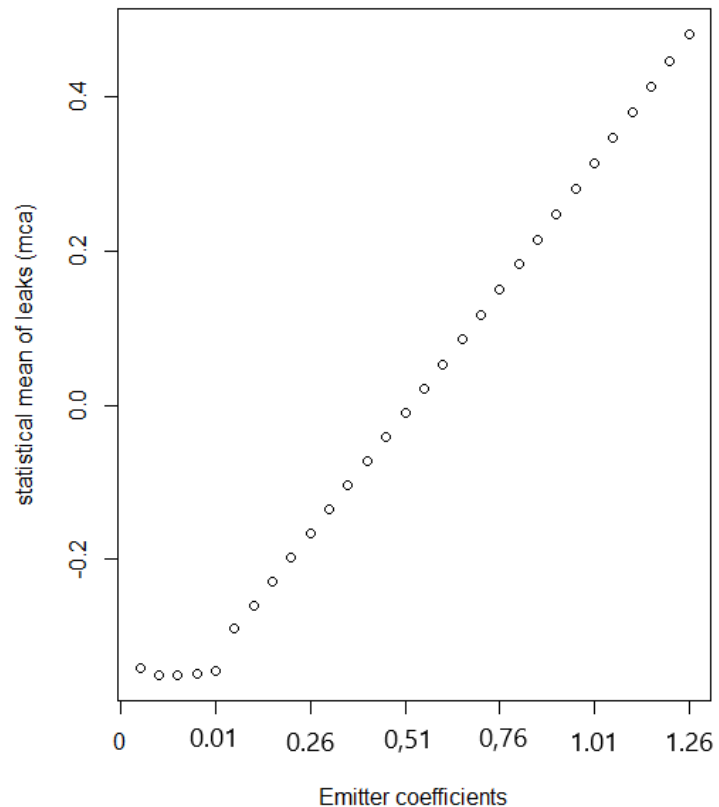


Figura 23. Gràfic de la mitjana estadística de les fuites expressada en mca.

6.Experiments

Els experiments s'han dut a terme en una quarta planta d'un edifici a Sabadell entre elmesos de Novembre i Desembre. El prototip s'ha connectat a la presa d'aigua on s'hi connecta la rentadora i ha estat enregistrant la pressió durant unes hores. Els objectius d'aquests experiments són, per una banda, veure com evoluciona la pressió en un punt d'estudi de la xarxa d'aigua real i, per l'altra, a partir dels registres determinar com es podria veure i detectar una fuga en aquesta xarxa.

Abans d'entrar en detall amb els experiments definitius, seria convenient veure gràficament l'impacte en la lectura de les dades que té el filtre passa baixos digital explicat anteriorment a l'apartat de Software. A la Figura 24 es pot veure una comparació d'un registre fet sense el filtre i un altre fet amb el filtre.

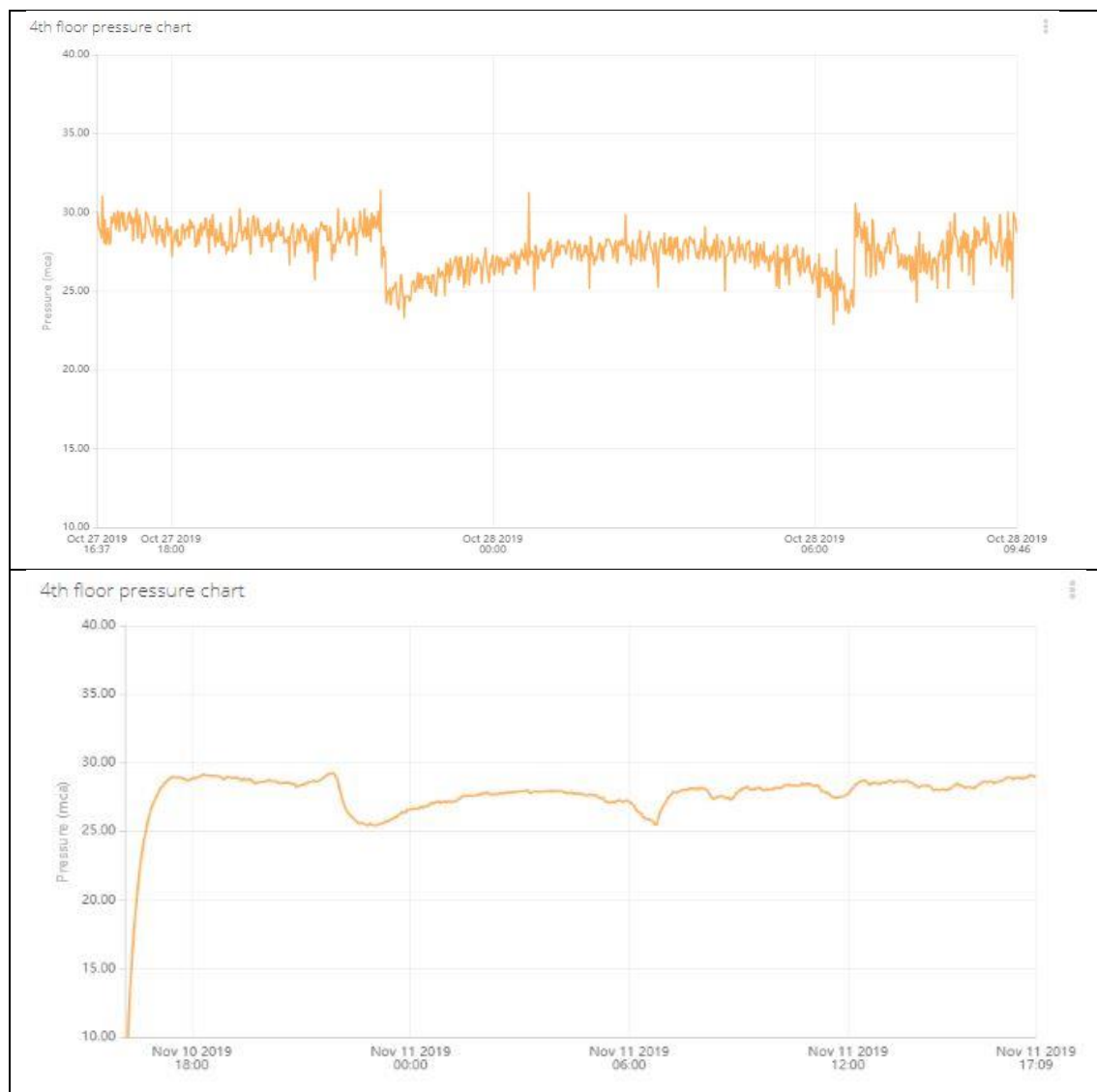


Figura 24. A dalt, registre sense filtre. A baix, registre amb filtre.

Com es pot veure a la figura anterior, la diferència entre ambdós gràfics és considerable. L'experiment fet sense el filtre conté soroll d'alta freqüència que dificulta el posterior anàlisi de les seves dades. Per altra banda, l'experiment fet amb el filtre suavitza aquest soroll i proporciona unes dades més fiables. El principal inconvenient del filtre en aquest cas, és el temps d'estabilització que necessita per començar a proporcionar unes mesures que s'aproximin a les dades reals de l'aplicació. Aquest problema es pot veure reflectit durant el règim transitori inicial de l'experiment amb filtre de la Figura 24.

Un cop explicada la funció del filtre passa baixos, ens centrarem ara en analitzar els experiments definitius que s'han dut a terme. S'han fet un total de quatre experiments en una mateixa franja horària i en diferents dies. La durada de cada experiment ha estat d'aproximadament unes 24 hores. El resultat dels quatre experiments es pot veure a la Figura 25.

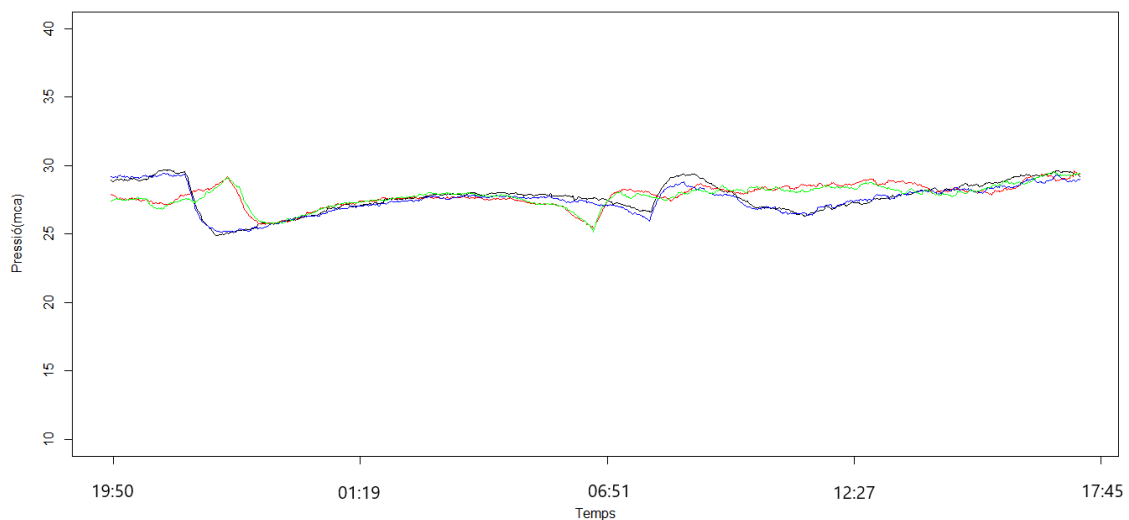


Figura 25. Resultat dels experiments definitius.

Els experiments de la figura anterior s'han fet entre les 19:50h i les 17:45h del dia següent. El color de cada gràfic correspon a un dia diferent:

- **Negre:** 30 de Novembre (19:50h) – 1 de Desembre (17:45h).
- **Vermell:** 2 de Desembre (19:50h) – 3 de Desembre (17:45h).
- **Blau:** 6 de Desembre (19:50h) – 7 de Desembre (17:45h).
- **Verd:** 10 de Desembre (19:50h) – 11 de Desembre (17:45h).

Com es pot veure al gràfic, l'evolució de la pressió segueix dos perfils diferents. Ambdós perfils tenen una baixada de pressió durant la nit però la seva forma és diferent. En aquest cas, els gràfics vermell i verd segueixen un perfil i els gràfics negre i blau responen a un perfil de pressió diferent. Això és degut a que els gràfics negre i blau corresponen a dies festius i els gràfics vermell i verd corresponen a dies laborals. El gràfic blau, per exemple, es va fer un Divendres però com que el 6 de Desembre és el dia de la Constitució correspon a un dia festiu. Per aquest motiu, s'analitzaran els gràfics en dos grups: un grup correspondrà als experiments fets en dies festius i l'altre grup correspondrà als que s'han fet en dies laborals.

L'anàlisi dels gràfics té com a objectiu esbrinar alguna manera de com es podria detectar una possible fuga. Per fer-ho es faran servir eines de simulació i els propis experiments, tot seguint els passos que es mostren a continuació per als dos perfils de pressió:

1. Fer una mitjana de de cada un dels perfils.
2. Escollir un coeficient emissor.
3. Aplicar aquest coeficient emissor a un node d'una xarxa d'Epanet i simular la fuga.
4. Obtenir la diferència de pressió del node on s'ha simulat la fuga.
5. Aplicar aquesta diferència de pressió a un dels gràfics.
6. Escollir un interval de temps i fer una integral comparant la diferència del gràfic on s'ha aplicat la fuga i la mitjana ($\int (p - \bar{p})$).
7. Representar gràficament el valor d'aquesta integral en funció de diferents coeficients emissors.

Per fer la mitjana dels dies festius, es sumaran els valors per a cada punt dels gràfics blau i negre i es dividiran entre dos. Per exemple, es sumarà el valor de pressió corresponent a les 19:50h del gràfic blau amb el valor de pressió corresponent a la mateixa hora del gràfic negre i es dividirà la suma entre dos. Aquest procés es repetirà per a tots els punts del gràfic fins obtenir la mitjana. El resultat es pot veure a la Figura 26.

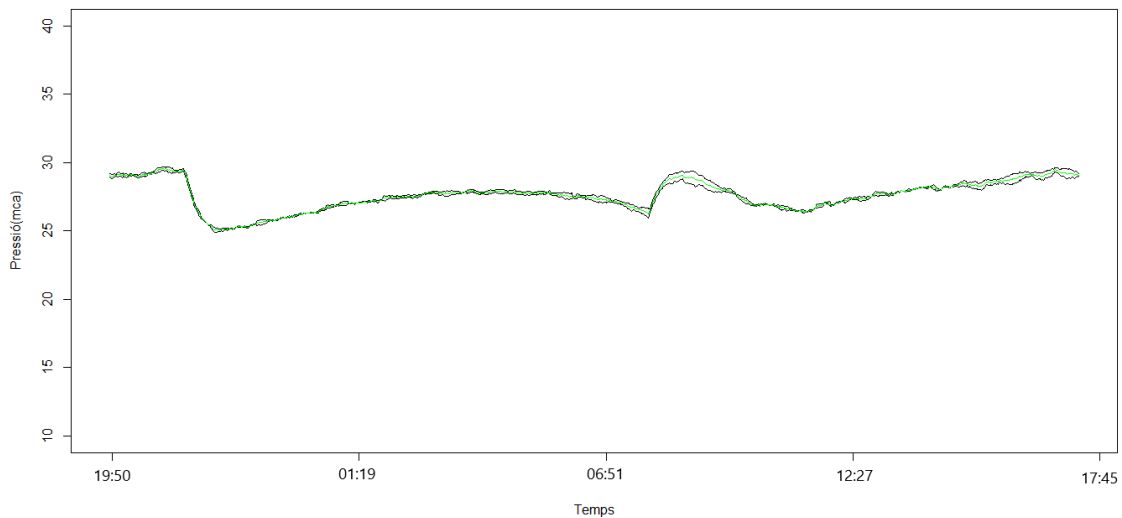


Figura 26. Gràfic amb la mitjana (verd) dels dies festius.

Un cop feta la mitjana, es procedirà a simular una fuga amb Epanet en un node aleatori i s'obtindrà la diferència de pressió del node. El valor de coeficient emissor que s'ha escollit, en aquest cas, és de 0,1. Un cop simulada la xarxa sense fuga, el valor de pressió d'un node que escollirem aleatòriament es pot veure a la Figura 27.

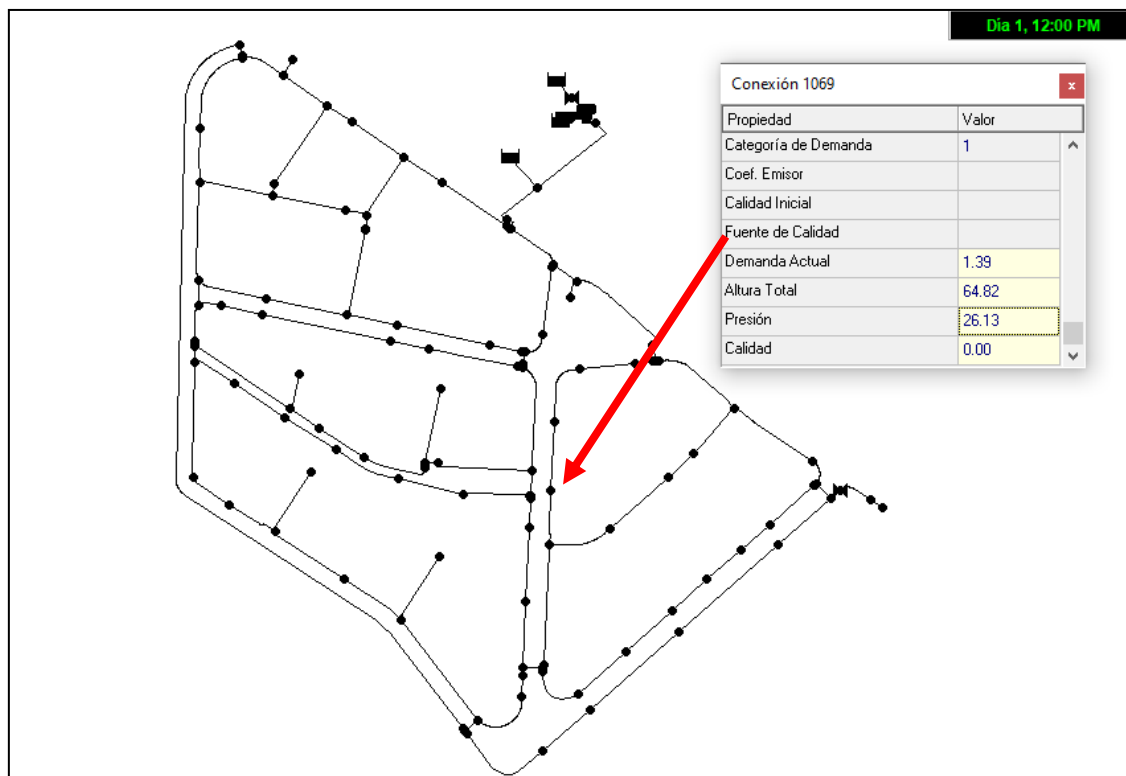


Figura 27. Simulació d'una xarxa d'aigua d'Epanet sense fuga.

Un cop simulada la xarxa sense cap tipus de fuga aplicada, es pot veure que el valor de pressió al node que hem escollit és de 26,13 mca. Si ara s'aplica la fuga mitjançant el coeficient emissor de 0,1 i aplicant-lo al mateix node, el resultat es pot veure a la Figura 28.

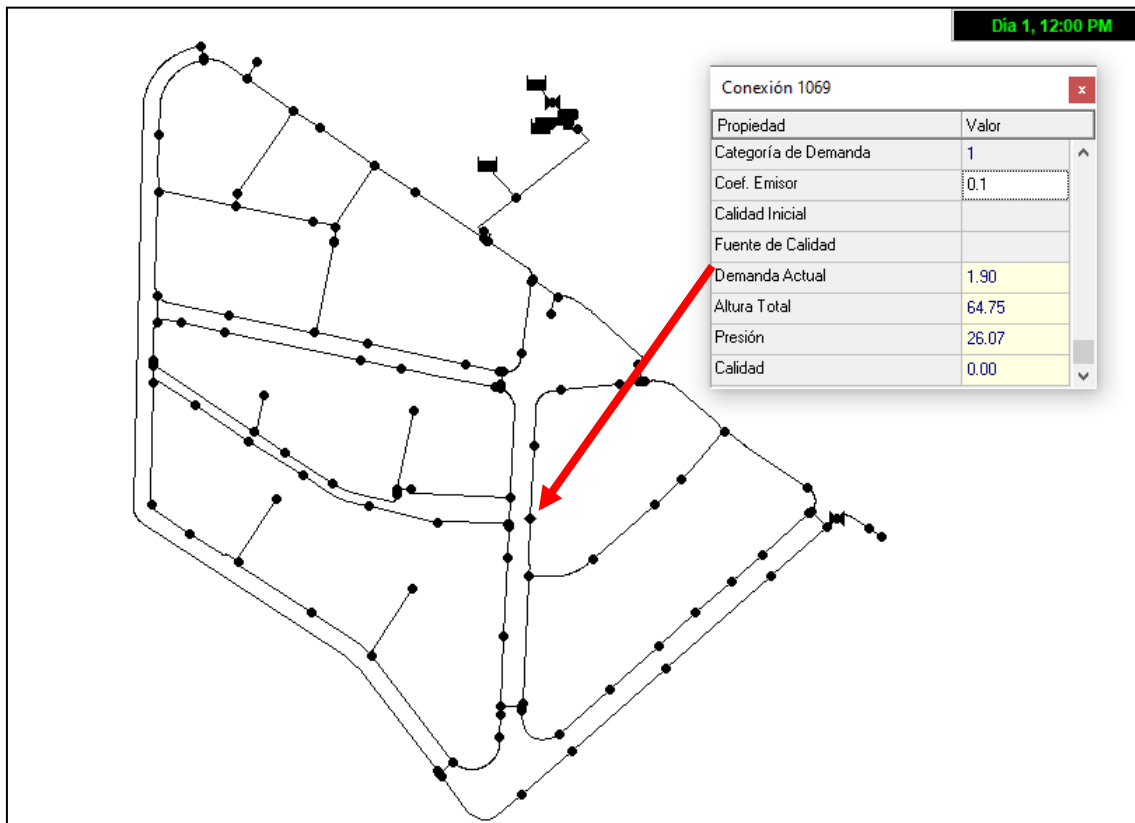


Figura 28. Simulació d'una xarxa d'Epanet amb fuga aplicada.

Com es pot veure a la Figura 28, quan un coeficient emissor de 0,1 s'aplica al node d'estudi, el seu valor de pressió és de 26,07 mca. Per tant, la diferència de pressió que en resulta és de 0,06 mca. Aquest és el valor de pressió que se li restarà a un dels experiments. En aquest cas, l'experiment que s'ha triat ha estat el gràfic comprès entre els dies 30 de Novembre i l'1 de Desembre.

Seguidament es procedeix amb la resta entre el gràfic dels dies festius on s'ha aplicat la fuga i la mitjana. El resultat de la diferència dels dos gràfics es pot veure a la Figura 29.

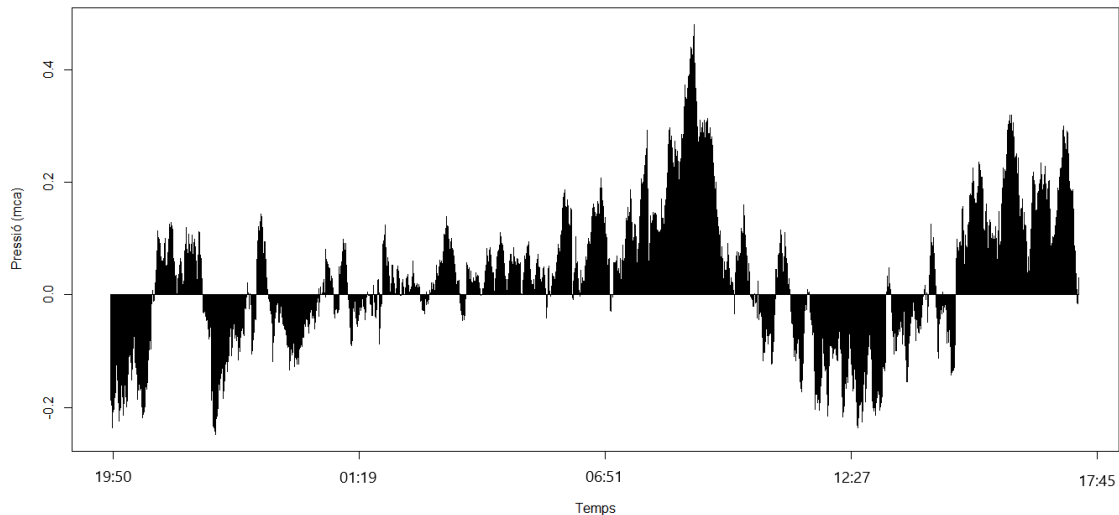


Figura 29. Diferència entre l'experiment del 30N-1D amb fuga aplicada i la mitjana dels dies festius.

A continuació s'ha de triar un interval d'estudi a partir del qual es farà la integral. En funció d'on s'esculli aquest interval i del mateix valor de l'interval, el valor de la integral tindrà uns valors o uns altres i el criteri per decidir si hi haurà una fuga o no serà també diferent. En aquest cas, la zona d'estudi que s'ha escollit serà durant la nit. Els marges dels intervals inferior i superior seran a la 01:19h i a les 06:51h, respectivament (veure Fig. 30).

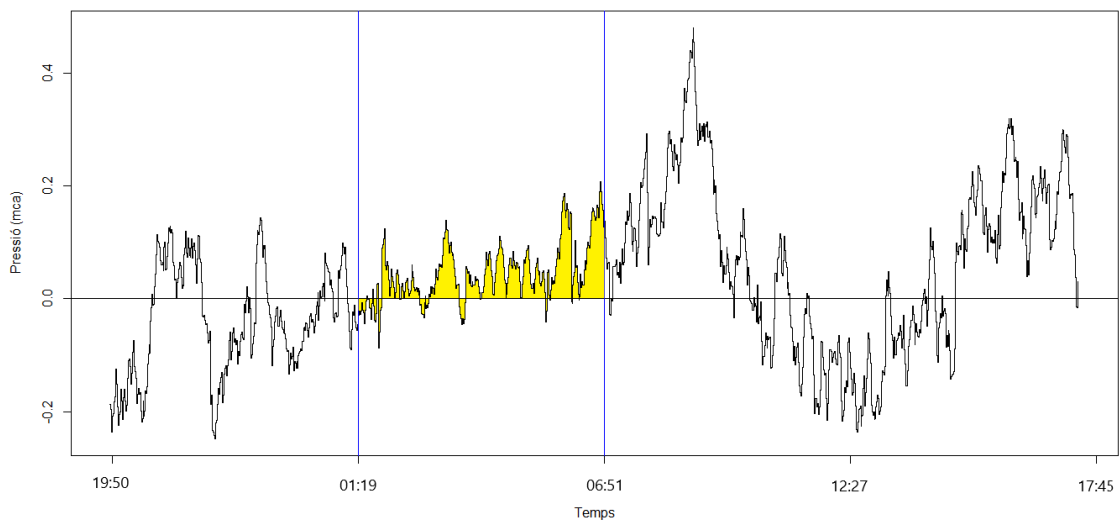


Figura 30. Àrea d'estudi on es farà el càlcul de la integral.

Com que la funció que defineix la pressió no és contínua, per fer la integral s'agafaran bocins d'àrea i s'aniran sumant fins a obtenir un valor aproximat de l'àrea de color groc de la figura anterior. Aquest procediment es pot veure resumit a la Figura 31.

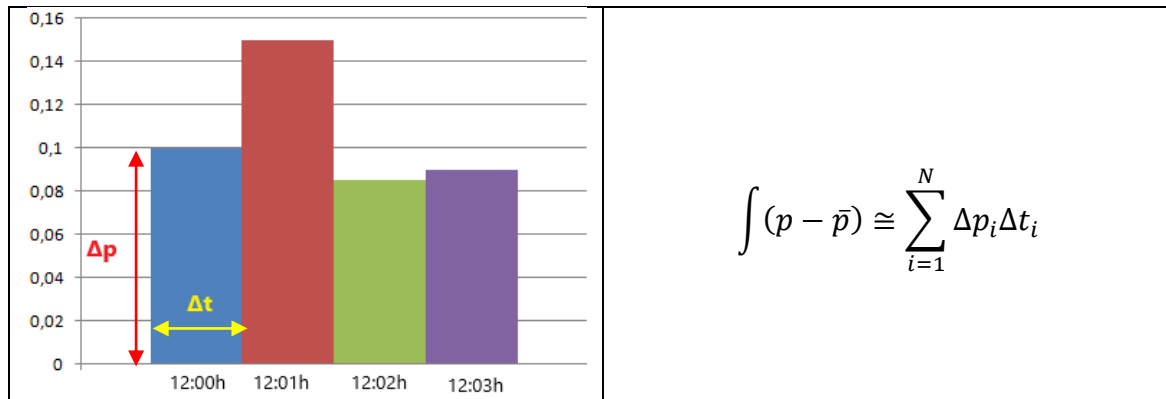


Figura 31. Procediment utilitzat per resoldre la integral.

Un cop realitzat tot el procés d'integració, el resultat serà un valor que podrà ser positiu, nul o negatiu. Quant més negatiu sigui aquest valor, implica que el valor de pressió anirà baixant respecte la mitjana i, per tant, hi haurà més probabilitats per determinar que hi ha hagut una fuga.

Després d'haver fet aquest procés per diferents valors de coeficient emissor aplicats al mateix node de la xarxa d'Epanet, el gràfic dels diferents valors d'aquesta integral aplicada als experiments del 30N-1D i del 6D-7D es mostra a la Figura 32.

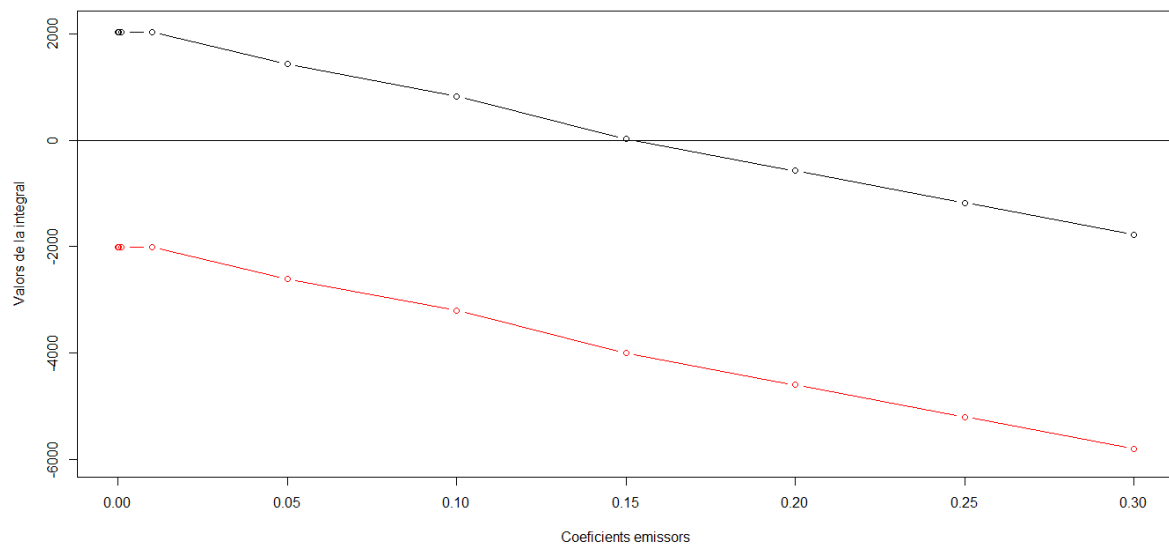


Figura 32. Valors de la integral respecte els coeficients emissors de l'experiment 30N-1D (negre) i de l'experiment 6D-7D (vermell). Anàlisi fet entre la 01:19h i les 06:51h.

Com es pot veure a la figura anterior, existeix un *offset* entre el gràfic d'un experiment i el de l'altre. Això és degut a que dins de l'interval d'estudi, un dels gràfics està per sobre de la mitjana i l'altre per sota. Aquest fenòmen representa un problema ja que, per exemple, el valor d'integral -2000 seria un valor normal per al gràfic vermell però seria un valor anormal per al gràfic negre donat que correspondria a un valor d'integral per un coeficient emissor superior a 0,3. Davant d'aquest problema, el criteri per decidir si hi haurà una fuga o no haurà de ser estrictament diferent per a cada un dels dos experiments. La falta d'experiments també dificulta la identificació dels marges dins dels quals el valor de la integral correspondria al d'una fuga o no ja que el valor de la mitjana depèn directament del número d'experiments utilitzats per calcular-la. En aquest cas, s'ha calculat mitjançant 2 experiments però si s'hagués calculat amb 70 experiments el valor de la integral per a cada experiment seria diferent.

7. Pressupost

| Component | Preu (€) | Enllaç |
|------------------------------|---------------|---|
| Sensor de pressió | 68,85 | https://www.mouser.es/ProductDetail/Honeywell/PX2CN2XX100PACHX?qs=sGAEpiMZZMvhQi7WZhFIADTeDUxB3enHj1KZpbweYcc= |
| Cable del sensor | 53,00 | https://www.tme.eu/es/details/3685301/cables-para-sensores/honeywell/?gclid=Cj0KCQIAifvwBRCKARIsAlqSWINCwXhhSk2ovmU1k3BGHmeevkj3GVcSN1Kv5jR1cteaJ77tFx5brWsaApJUEALw_wcB&brutto=es |
| Arduino NodeMCU | 3,96 | https://www.ebay.es/i/223177200231?chn=ps |
| Font d'alimentació 5V | 3,95 | https://www.amazon.es/Ociodual-Cargador-Universal-Europeo-Alimentador/dp/B076D88M18/ref=asc_df_B076D88M18/?tag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=298079334377&hvpos=1o4&hvnetw=g&hvrnd=5788360804941688003&hvpone=&hvptwo=&hvgmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=9047032&hvtargid=pla-685860301177&psc=1 |
| Font d'alimentació regulable | 1,70 | https://es.aliexpress.com/item/32857105606.html?spm=a2g0o.detail.1000060.1.39f65a2fZsTlMo&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.90158.0&scm_id=1007.13339.90158.0&scm-url=1007.13339.90158.0&pvid=1d2ec4de-ad47-4e0f-83fc-3b684f5a6b27 |
| Total | 131,46 | - |

Taula 3. Taula de pressupostos dels components de hardware.

| Component | Quantitat | Preu (€) |
|--------------------------------------|-----------|--------------|
| Manguera Nylon 1,5m | 1 | 2,47 |
| Tub 50ml PTFE | 1 | 7,56 |
| Connexió T llautó 3/4 | 2 | 4,23 |
| Macle llautó 3/4 | 2 | 1,55 |
| Reducció llautó M-F 3/4 x1/2 | 2 | 1,03 |
| Reducció cilindre cromat M-F 1/2x1/4 | 1 | 0,99 |
| Reducció cilindre cromat M-F 1/2x1/8 | 1 | 0,94 |
| Aixeta Racor 3/4x1 | 1 | 4,21 |
| Total + IVA | - | 27,80 |

Taula 4. Taula de pressupostos del muntatge experimental.

8.Conclusions

Per finalitzar amb el projecte cal dir que s'han aconseguit els objectius establerts inicialment. S'ha realitzat el muntatge d'un prototipus funcional amb èxit, s'ha dut a terme una recollida de dades de pressió en un punt d'una xarxa d'aigua real, s'ha fet ús d'eines de simulació que s'han utilitzat per tractar amb les mesures reals i finalment s'han tractat aquestes dades per fer un posterior estudi sobre la detectabilitat de fuites. A més a més, pel que fa a les mesures reals de pressió, s'ha detectat un comportament diferent pels dies festius i pels dies no festius.

Tot i els èxits anteriors, també s'han trobat mancances en aquest projecte. A continuació s'enuncien un conjunt de millores que es podrien fer per reduir els punts febles del projecte:

- El pressupost econòmic del projecte ha resultat ser força car. En cas de que es desitgés industrialitzar el prototipus, s'hauria d'explorar la reducció de costos en base a unes comandes a gran escala.
- La plataforma d'adquisició de dades Ubidots és de pagament. Això fa que l'ús d'aquest projecte sigui només vàlid per al prototipatge. Per tant, caldria dissenyar una plataforma que permetés captar les dades a temps real de forma gratuïta. S'han trobat drivers per tal de comunicar el sistema d'adquisició amb un lloc web però en l'entorn Linux. Probablement es podria arribar a trobar per Windows o sinó desenvolupar-los. També cabria la possibilitat de canviar d'entorn.
- La informació que aporten els experiments és limitada degut a la falta de coneixement sobre les xarxes del municipi. És complex i difícil dissenyar un model sobre la detectabilitat de fuites únicament amb la informació d'un node de la xarxa. La companyia comptaria amb aquesta informació, per exemple la pressió a l'entrada del sensor permetria ajustar el comportament dels dies sense fuites a un model independent.
- A part de l'ús d'aquestes dades, caldria fer molts experiments per tal de tenir suficients dades que servissin per construir un model sobre la detectabilitat de fuites en el mateix.

9. Annexos

Heavy Duty Pressure Transducers

PX2 Series, 1 bar to 70 bar | 100 kPa to 7 MPa | 15 psi to 1000 psi

Table 2. Electrical Specifications

| Characteristic | Ratiometric Output | | | | Current Output | Regulated Output | | | |
|---|---|--------------|--------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Output Transfer Function Order Code ¹ | | | | | | | | |
| | AA | AB | AC | AD | CH | BC | BD | BE | BG |
| Output transfer function ² : | | | | | | | | | |
| null output value | 10% of V_s | 5% of V_s | 10% of V_s | 5% of V_s | 4 mA | 1 V | 0.25 V | 0.5 V | 1 V |
| full scale output value | 90% of V_s | 95% of V_s | 90% of V_s | 95% of V_s | 4 mA | 6 V | 10.25 V | 4.5 V | 5 V |
| full scale span (FSS) | 80% of V_s | 90% of V_s | 80% of V_s | 90% of V_s | 16 mA | 5 V | 10 V | 4 V | 4 V |
| operating supply voltage, min. (V_s) ³ | 4.75 V | 4.5 V | 3.135 V | 3.135 V | 8 V | 9 V | 13 V | 8 V | 8 V |
| operating supply voltage, typ. (V_s) ⁴ | 5 V | 5 V | 3.3 V | 3.3 V | — | — | — | — | — |
| operating supply voltage, max. (V_s) ⁵ | 5.25 V | 5.5 V | 3.465 V | 3.465 V | 30 V ⁶ | 30 V ⁶ | 30 V ⁶ | 30 V ⁶ | 30 V ⁶ |
| Supply current (typ.) | 5 mA | | 4 mA | | — | 5.5 mA | | | |
| Output load (pull up or down): | | | | | | | | | |
| minimum | 2 kOhm | | | | — | 2 kOhm | | | |
| maximum | — | | | | ($V_s - 8$) x 50 Ohm ⁷ | — | | | |
| Absolute voltage ratings ⁸ : | | | | | | | | | |
| minimum ⁸ | -16 V | | | | -16 V | -16 V | | | |
| maximum ⁸ | 16 V | | | | 30 V | 30 V | | | |
| maximum applied to output pin (short circuit protection) ⁷ | V_s | | | | — | 12 V | | | |
| EMC rating ⁹ : | | | | | | | | | |
| CE compliance: | | | | | | | | | |
| electrostatic discharge | ±4 kV contact, ±8 kV air per IEC 61000-4-2 | | | | | | | | |
| radiated immunity | 10 V/m (80 MHz to 1000 MHz) per IEC 61000-4-3 | | | | | | | | |
| fast transient burst | ±1 kV per IEC 61000-4-4 | | | | | | | | |
| immunity to conducted disturbances | 3 V per IEC 61000-4-6 | | | | | | | | |
| radiated emissions | 40 dB 30 MHz to 230 MHz; 47 dB 230 MHz to 1000 MHz per CISPR 11 | | | | | | | | |
| ISO 11452-2 radiated immunity | 100 V/m 200 MHz to 2 GHz | | | | | 20 V/m 200 MHz to 2 GHz | | | |

¹ Output transfer function options are shown in the Nomenclature and Order Guide. (See Figure 4.)

² Transducer will not produce valid output when supply voltage is outside of operating range.

³ Applies at 25°C. See Figure 2 for Regulated Output Supply Voltage.

⁴ Applies at 25°C. See Figure 3 for Current Output Supply Voltage.

⁵ Absolute maximum ratings are the extreme limits the device can withstand without damage to the product. Voltages above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability.

⁶ Absolute voltage applies to potential across power and ground terminals.

⁷ Short circuit protection between output pin and ground, and output pin and supply pin.

⁸ All EMC ratings verified with the Metri-Pack 150 electrical connector type.

Figure 2. Regulated Output Supply Voltage

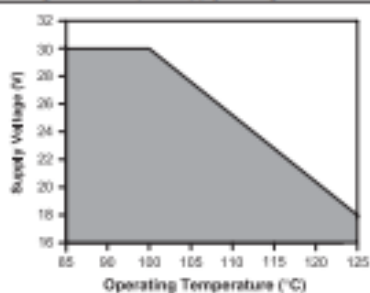
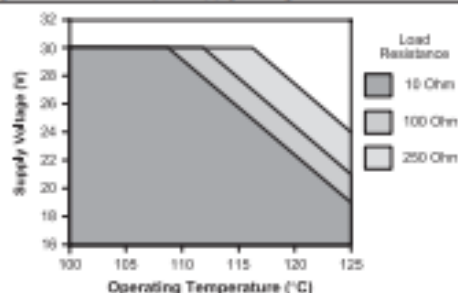


Figure 3. Current Output Supply Voltage



Sensing and Internet of Things 3

Annex 1. Informació tècnica sobre la família de sensors de pressió de Honeywell. Cortesia de Honeywell.

```
library(epanet2toolkit)
library(epanetReader)
ENopen("TestINP.inp", "TestINP.rpt")
numnodes<-ENgetcount("EN_NODECOUNT")-ENgetcount("EN_TANKCOUNT")
patindex<-0
initialDemand<-seq(1,numnodes)
finalDemand<-seq(1,numnodes)
fuita<-seq(length=numnodes,from=0,to=0)
fuitapromig<-seq(length=15,from=0,to=0)
coeff<-seq(1,15)
coeff[1]<-0.000001
for(i in 2:length(coeff)){
  if(coeff[i-1]>=1){
    coeff[i]<-coeff[i-1]+0.05
  }
  else{
    coeff[i]<-coeff[i-1]*10
  }
}
for(i in 1:numnodes){
  patindex<-ENgetnodevalue(i, "EN_PATTERN")
  if(patindex!=2){
    ENsetnodevalue(i, "EN_BASEDEMAND", 0)
  }
}
ENSolveH()
for(i in 1:numnodes){
  initialDemand[i]<-ENgetnodevalue(i, "EN_DEMAND")
  initialDemand[i]<-{initialDemand[i]*1000}/3600
}
for(x in 1:length(coeff)){
  for(i in 1:numnodes){
    ENsetnodevalue(i, "EN_EMITTER", coeff[x])
    ENSolveH()
    finalDemand[i]<-ENgetnodevalue(i, "EN_DEMAND")
    finalDemand[i]<-{finalDemand[i]*1000}/3600
    fuita[i]<-finalDemand[i]-initialDemand[i]
    ENsetnodevalue(i, "EN_EMITTER", 0)
  }
  fuitapromig[x]<-sum(fuita)/numnodes
}
plot(fuitapromig, xlab="Emitter coefficients", ylab="statistical mean of leak")
ENclose()
```

Annex 2. Script sobre la detectabilitat de fuites en funció de la demanda.

```
library(epanet2toolkit)
library(epanetReader)
ENopen("TestINP.inp", "TestINP.rpt")
numnodes<-ENgetcount("EN_NODECOUNT")-ENgetcount("EN_TANKCOUNT")
patindex<-0
initialPressure<-seq(1,numnodes)
finalPressure<-seq(1,numnodes)
fuita<-seq(length=numnodes,from=0,to=0)
fuitapromig<-seq(length=30,from=0,to=0)
coeff<-seq(1,30)
coeff[1]<-0.000001
for(i in 2:length(coeff)){
  if(coeff[i-1]>=0.1){
    coeff[i]<-coeff[i-1]+0.05
  }
  else{
    coeff[i]<-coeff[i-1]*10
  }
}
for(i in 1:numnodes){
  patindex<-ENgetnodevalue(i, "EN_PATTERN")
  if(patindex!=2){
    ENsetnodevalue(i, "EN_BASEDEMAND", 0)
  }
}
ENSolveH()
for(i in 1:numnodes){
  initialPressure[i]<-ENgetnodevalue(i, "EN_PRESSURE")
}
for(x in 1:length(coeff)){
  for(i in 1:numnodes){
    ENsetnodevalue(i, "EN_EMITTER", coeff[x])
    ENSolveH()
    finalPressure[i]<-ENgetnodevalue(i, "EN_PRESSURE")
    fuita[i]<-initialPressure[i]-finalPressure[i]
    ENsetnodevalue(i, "EN_EMITTER", 0)
  }
  fuitapromig[x]<-sum(fuita)/numnodes
}
plot(fuitapromig, xlab="Emitter coefficients", ylab="statistical mean of leaks (mca)")
ENclose()
```

Annex 3. Script sobre la detectabilitat de fuites en funció de la diferència de pressions.

10.Referències

1. Libro de Consulta para Evaluación Ambiental (Volumen I; II y III). Trabajos Técnicos del Departamento de Medio Ambiente del Banco Mundial.
2. Almandoz, J., Cabrera E., Arregui, F., Cabrera Jr. E. y Cobacho, R. 2005. Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation Journal of Water resources Planning and Management, 131(6), 458-466.
3. Rossman, Lewis (2007). «EPANET 2.0». Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA. Archivado desde [el original](#) el 27 de mayo de 2007. Consultado el 2007 - 07 - 16.
4. https://en.wika.com/upload/TA_0314_CEP_en_co_57961.pdf
5. Eck, B.J., 2016. Epanetreader: a package for reading epanet files into R. In: World Environmental and Water Resources Congress, pp. 487-496. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479865.051>.
6. <https://ubidots.com/about/>
7. Banzi, Massimo; Shiloh, Michael. *Getting started with Arduino* (3th Edition). Sebastopol, CA.
8. <https://www.luisllamas.es/arduino-paso-bajo-exponencial/>